

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Воронцов Борис Сергійович

УДК 621.9.04

ДИСЕРТАЦІЯ

Комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Б.С. Воронцов

Науковий консультант Пасічник Віталій Анатолійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2018

АНОТАЦІЯ

Воронцов Б.С. Комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

В дисертаційній роботі визначена, науково обґрунтована і вирішена актуальна науково-технічна проблема – забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри, що забезпечують формоутворення зубчастих коліс, які мають різну форму профілю зуба, з можливістю автоматизованого проектування, інтерактивного керування та візуалізації результатів. Розроблено математичну модель системи формоутворення зубчастих коліс, яка базується на узагальненому представленні функції формоутворення, що дозволило, в сукупності з математичною моделлю оброблювальної поверхні зубчастих коліс, уніфікувати математичний опис та інтерактивно отримувати вихідну інструментальну поверхню.

Отримало подальший розвиток використання кінематичних схем формоутворення 3-го класу стосовно часткових випадків, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій, для яких одержано математичні залежності функції формоутворення, що стало основою удосконалення інструментів типу «однопорожнинний гіперболоїд».

На основі запропонованих теоретичних та методологічних положень розроблено комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення

зубчастих коліс. Результати роботи впроваджено у виробництво, зокрема з використанням розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для виготовлення зубчастих коліс з уніфікованим профілем зубців.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану проблеми забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності і плавності роботи зубчастих передач, профіль зубів яких окреслено довільної, не тільки евольвентної кривої, а також скорочення термінів технологічної підготовки їх виробництва.

Базовим поняттям у вирішенні задач формоутворення є ідеальний процес – модель реального процесу. При розробленні ідеального процесу формоутворення враховуються основні фактори, які впливають на форму оброблюваної поверхні виробу. Вважається, що деталь, інструмент та обладнання не деформуються і не зношуються, теоретично точно виготовлені і працюють елементи технологічної системи, точно здійснюється налагоджування обладнання, не враховується вплив на процес формоутворення теплових явищ.

Особливу увагу приділено аналізу причин виникнення похибок теоретичного формоутворення і питань отримання геометрично точних функціональних поверхонь зубчастих коліс і зуборізних інструментів, що практично важливо для створення електронних еталонів комп'ютерних моделей цих виробів – основи сучасних комп'ютерних систем проектування, аналізу, виробництва і контролю.

Показано, що не вирішивши питання забезпечення точності в теоретичному плані на етапі проектування виробу і процесу його формоутворення, неможливо отримати позитивні результати в процесі обробки.

Сформульовано і обґрунтовано три групи вимог до комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс: до математичного забезпечення (інваріантність, єдність параметрів, мінімальна

достатність керуючих параметрів); до структури (модульність, забезпечення інтерфейсу з CAD/CAM/CAE); до результатів (інтерактивна керованість, візуалізація результатів). Проведений аналіз показав, що жодна з комерційних систем автоматизованого проектування не відповідає повною мірою вимогам до комп'ютерно-інтегрованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Зазначено, що в даний час застосовується велика різноманітність математичного опису вихідних контурів твірних поверхонь для формоутворення зубчастих коліс. Незважаючи на те, що евольвентні зубчасті колеса займають значне місце в сучасних механізмах, для багатьох технічних завдань доцільніше використовувати зубчасті колеса з профілем зубців, відмінним від евольвентних. Це зубчасті колеса с зачепленням Новікова, синусоїдальні, циклоїдальні та інші зубчасті колеса. Кожен з цих типів зубчастих коліс потребує відокремлене математичне, методичне та програмне забезпечення для задач їх формоутворення та проектування вихідних інструментальних поверхонь. Тому, для створення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення потрібне математичне забезпечення з уніфікованими параметрами для любого типу зубчастих коліс.

Проаналізовані складові, які характеризують точність зубчастих коліс. Це кінематична точність, плавність роботи та площа контакту зубців. На ці складові впливають різні фактори, пов'язані з усіма елементами системи формоутворення.

Зазначено, що сучасний стан аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодіючих поверхонь дозволяє представити геометричні та кінематичні показники, як функції від керуючих параметрів формоутворюваних поверхонь. Це дає можливість включати ці показники в систему формоутворення і в інтерактивному режимі оцінити ефективність процесу формоутворення.

У другому розділі розроблені методи формування математичної моделі інтерактивного керування кривими і поверхнями, які враховували б

можливість наскрізної параметризації елементів систем формоутворення, геометричних і кінематичних показників і сприяли б інтеграції з автоматизованими системами проектування, виготовлення, аналізу і контролю.

Інтерактивне керування формоутворенням функціональної поверхні в залежності від поставлених задач можна здійснювати двома способами: шляхом перетворення простору, в який поміщається вихідна крива, що описує профіль, або функціональна поверхня і шляхом зміни внутрішніх параметрів, що визначають геометрію функціональної поверхні зубчастих коліс.

Математичний опис профілів зубчастих коліс, приведений до універсального виду на базі уніфікованих керуючих параметрів забезпечує апроксимацію точкового подання цих профілів сплайнами і створює основу для використання єдиних методичного, алгоритмічного і програмного забезпечень при автоматизації процесу формоутворення, що в сукупності забезпечує як підвищення точності опису та виготовлення функціональних поверхонь зубчастих коліс і зубообробного інструменту, так і скорочує термін конструкторсько-технологічного підготовки виробництва.

У третьому розділі розроблені нові підходи до узагальненого опису функції формоутворення, уніфіковано її математичне подання та проаналізовані можливості її застосування.

Особливий інтерес представляє класична класифікація кінематичних схем формоутворення, запропонована професором П.Р. Родіним. На її основі можлива розробка узагальненого математичного опису функції формоутворення з використанням керуючих параметрів, що дозволяють переходити в інтерактивному режимі від одного типу і класу кінематичних схем до іншого.

Розвиток теорії формоутворення дозволяє розширити можливості взаємодії спряжених поверхонь і розглядати нові типи схем формоутворення, на основі яких можна створювати інструменти з покращеними

властивостями.

Запропонований новий підхід до узагальненого опису функції формоутворення зубчастих коліс, заснований на її матричному представленні і уніфікованих керуючих параметрах кривої, яка описує профіль зуба, дозволив уніфікувати математичний опис і реалізувати інтерактивне керування структурою системи формоутворення і автоматизувати проектування вихідної інструментальної поверхні.

У четвертому розділі розроблено математичне забезпечення для опису геометричних та кінематичних показників контактування спряжених поверхонь, як функції від уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення, що дозволяє реалізувати інтерактивний аналіз процесу формоутворення зубчастих коліс.

Розроблена математичну модель для комплексного аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, дозволила ще на стадії проектування аналізувати як умови взаємодії оброблюваних та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх виготовлення, так і умови контактування спряжених зубців зубчастих коліс.

У п'ятому розділі запропоновано концепцію інтеграції розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс з CAD/CAM/CAE–системами.

Інтерактивне керування автоматизованою системою формоутворення має здійснюватися за допомогою уніфікованих керуючих параметрів, які змінюють форму вихідної поверхні та кінематичну схему формоутворення. При цьому одночасно змінюються всі елементи системи, включаючи геометричні та кінематичні показники процесу формоутворення. Інтерактивний аналіз цих показників в процесі синтезу служить зворотним зв'язком і допомагає додатково використовувати досвід і знання проектувальника для швидкої оцінки застосовності результату.

Використання єдиних уніфікованих параметрів дозволяє інтегрувати систему формоутворення, що включає попередню оцінку геометрії і

кінематики процесу, в автоматизовані системи проектування, виробництва, аналізу і контролю.

У шостому розділі наведені результати впровадження роботи. За допомогою розробленого в роботі математичного, методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення були спроектовані і виготовлені шевронні, гвинтові та гіперболоїдні зубчасті колеса, а також, спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для механічного оброблення циліндричних зубчастих коліс.

У дисертаційній роботі в результаті комплексних досліджень процесу формоутворення зубчастих коліс в частині інтерактивного керування формою поверхні, параметризації функції формоутворення для різних кінематичних схем, аналізу геометричних та кінематичних показників як процесу формоутворення, так і процесів взаємодії зубців зубчастих коліс, реалізована комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри системи формотворення, її елементів, якісних показників, що забезпечує можливість розробки автоматизованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс та їх інтеграцію в системи автоматизованого проектування, виробництва, аналізу та контролю.

Використання комп'ютерно-інтегрованої системи призвело до скорочення строків розробки та удосконаленню зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс.

Ключові слова: механічна обробка, зубчасті колеса, формоутворення, зубооброблювальний інструмент, комп'ютерна інтеграція, автоматизований процес проектування, інтерактивне керування.

Список публікацій здобувача

1. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А.

Бочарова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып.8. – С.170 – 173. (запропоновано алгоритм і отримані твердотільні моделі колеса і шестерні тягової передачі, які мають різну геометрію поверхонь зубців).

2. Воронцов Б.С. Создание трехмерных твердотельных моделей тяжелонагруженных колес с бочкообразными зубьями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №9 (67). -С.231 – 235. (розроблено прикладну бібліотеку, яка дозволяє автоматизувати процес створення твердотільних моделей зубчастих коліс з бочкоподібними зубцями по перетинах).

3. Воронцов Б.С. Концептуальные вопросы интеграции конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №11(69). - С.194 – 198. (розроблено алгоритм інтеграції конструкторських і технологічних систем автоматизованого проектування).

4. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещивающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А.Кириченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2005. – №7 (89) – С. 34 – 36. (розроблено механізм оперативного управління геометрією передач в інтерактивному режимі).

5. Дорошенко Ю.О. Політканинні перетворення у конструюванні профілю вихідного контуру зуборізного інструменту / Ю.О. Дорошенко, І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.11. - С. 68 – 74. (отримано аналітичні залежності для управління геометрією профілю зуборізного інструменту з використанням апарату політканевих перетворень).

6. Воронцов Б.С. Моделирование гиперboloидных инструментов с

использованием CAD – систем / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, И.А. Бочарова, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 318 – 323. (запропоновано алгоритм твердотільного моделювання гіперболоїдних інструментів для виготовлення різних типорозмірів циліндричних зубчастих коліс).

7. Бочарова І.А. Модифікація твірної поверхні з використанням кривої Безьє третього порядку / І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 4, т.30.– С. 116 – 120. (запропоновано методику здійснення геометричної модифікації твірної поверхні з використанням кривих Безьє третього порядку).

8. Воронцов Б.С. Допоміжні ділянки вихідного контуру зубчастих коліс / Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.13. – С. 179 – 185. (отримані математичні залежності, які дозволяють забезпечити автоматичну побудову допоміжних ділянок вихідного контуру зубчастих коліс).

9. Бочарова И.А. Зуботочение цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 30. – С.32 – 36. (отримано комп'ютерні моделі інструментів, задні поверхні яких не мають затилування).

10. Воронцов Б.С. Интерактивное управление синтезом зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вестник национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. трудов. Тематический выпуск «Проблемы механического привода». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – №40. – С. 182 – 187.

11. Воронцов Б.С. Компьютерное управление геометрией зубьев зубчатых колес и зуборезных инструментов / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова //

Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну: міжвід. наук.– техн. збірник. – К.: ДОП КНУТД, 2005. – С.184 – 189. (отримано аналітичні залежності, що описують твірну поверхню і визначають відповідні їй геометро-кінематичні показники).

12. Воронцов Б.С. Производящая поверхность реечного типа с изменяемой продольной формой зуба / Б.С. Воронцов, Т.Н. Чаплинская // Системні технології: Регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 2 (43). – С.53 – 56. (розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє управляти поздовжньої лінією зубців при синтезі циліндричних передач з арковими і двоопукло-увігнутими зубцями).

13. Воронцов Б.С. Гиперболоидные инструменты для изготовления цилиндрических колес с произвольным профилем зуба / Б.С.Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – Вип. 19. – С.76 – 81.

14. Воронцов Б.С. Взаємообвідні поверхні циліндричних передач з круговою лінією зубців / Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип. 4, т. 33. – С. 130 – 135. (розроблено математичний апарат і комп'ютерну програму для зміни поздовжньої форми зубців за допомогою керуючих елементів).

15. Воронцов Б.С. Гиперболоидные передачи с управляемым исходным контуром производящего колеса / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006 – №22. – С. 56 – 60.

16. Воронцов Б.С. Визуальный динамический синтез сопряженных поверхностей / Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2006. – Вип.15.– С. 107– 113.

17. Витренко В.А. Технологические особенности изготовления гиперболоидного инструмента для финишной обработки зубчатых колес /

В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, А.В. Лейба, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 32. – С.64 – 68. (отримано профіль гіперболоїдного багатозахідного шліфувального круга, що описується за допомогою циліндричного зубчастого колеса в просторовому верстатному зачепленні).

18. Воронцов Б.С. Профилирование зубьев производящего колеса на основе геометрических преобразований / Б.С.Воронцов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля.– Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – №3 (97). – С. 31 – 36.

19. Воронцов Б.С. Компьютерное формообразование твердотельных моделей гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С.298 – 302.

20. Воронцов Б.С. Особенности твердотельного компьютерного моделирования гиперболоидных передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №21. – С. 249 – 254.

21. Витренко В.А. Технологические особенности проектирования и изготовления гиперболоидных колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 34. – С.47 – 53. (отримано конструктивні параметри гіперболоїдних коліс і спроектованих на їх базі інструментів).

22. Воронцов Б.С. Автоматизированная система синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С.133 – 138. (розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати апроксимацію таблично представлених кривих, що описують вихідні контури).

23. Воронцов Б.С. Унификация геометрии рабочих поверхностей зубьев при синтезе передач зацеплением / Б.С.Воронцов, И.А.Бочарова, Д.А.Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №29. – С. 24 – 28. (виконано аналіз комп'ютерно-графічного і аналітичного способів апроксимації таблично представлених профілів кривими Безье третього порядку).

24. Воронцов Б.С. Единая информационная модель конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2008. – С.139 – 142. (проаналізовано можливості сучасних систем автоматизованого проектування при моделюванні складних поверхонь деталей).

25. Воронцов Б.С. Повышение эффективности единичного производства сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С. 227 – 231. (запропоновано спосіб отримання, аналізу та вдосконалення твердотільних комп'ютерних моделей деталей зі складною геометрією).

26. Воронцов Б.С. Синтез и изготовление сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №20. – С. 54 – 59. (розроблено програмне забезпечення для синтезу складнопрофільних зубчастих коліс з поліпшеними експлуатаційними властивостями).

27. Бочарова И.А. Накатка зубьев цилиндрических колес методом ПДУ / И.А. Бочарова, О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко //

Вестник двигателестроения: научно– технич. журнал. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – №2. – С. 102 – 105. (отримано оптимальні параметри накатного інструменту і визначена його конструкція).

28. Бочарова И.А. Особенности формообразования зубчатых колес для гиперболоидных передач / И.А. Бочарова, А.В. Витренко, Б.С. Воронцов// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 50 – 53. (розроблено алгоритм поверхневого і твердотільного комп'ютерного моделювання передач з осями, що схрещуються).

29. Воронцов Б.С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №27. – С. 49 – 54.

30. Воронцов Б. С. Анализ условий контактирования гиперболоидного инструмента и изготавливаемого колеса в системе PowerSHEPE / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С. 291 – 298.

31. Витренко В.А. Поверхностное моделирование гиперболоидных инструментов в сиситеме PowerSHAPE / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №29. – С. 30 – 35. (розроблено алгоритм і методику поверхневого моделювання зубців гіперболоїдна інструменту).

32. Витренко В.А. Формообразование зубьев многозаходных зубообрабатывающих инструментов / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова, В.В. Черновол // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська

політехніка, 2011. – Вип. 713. – С.3 – 6. (розроблено принципово нову схему формоутворення гіперболоїдних зуборізних фрез і долб'яків).

33. Витренко О.С. Исследование процесса формообразования гиперболоидных зубчатых колес при помощи инструментального зубчатого колеса / О.С. Витренко, И.А. Кириченко, Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С. 188 – 194. (розроблено ряд нових схем формоутворення гіперболоїдних зубчастих коліс з різним кутом нахилу зубців і збільшеним коефіцієнтом перекриття).

34. Воронцов Б.С. Использование унифицированных параметров при автоматизации проектирования зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2012. – Вип. 746. – С.180 – 185.

35. Витренко О.С. Накатка зубьев зубчатых колес при помощи гиперболоидных накатников / О.С. Витренко, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 203 – 208. (проведено дослідження профілю зубців, які отримані за допомогою гіперболоїдних накатників).

36. Вітренко В.О. Профілювання зубооброблювального обкатного інструменту / В.О. Вітренко, Б.С. Воронцов, І.А.Бочарова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – Вип. 772. – С.56 – 59. (отримані у теоретичному вигляді та обґрунтовані гіперболоїдні обкатні інструменти, які одержані за допомогою інструментальної поверхні, що повністю співпадає з поверхнею формоутворюючого зубчастого колеса).

37. Воронцов Б. С. Компьютерная интеграция систем и процессов

формообранования при механической обработке / Б.С. Воронцов, В.А. Пасечник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 17 – 23. (розроблено принципово нові принципи комп'ютерної інтеграції систем формоутворення зубчастих коліс)

38. Vitrenko V.A. Rolling of teeth of cylindrical teeth– wheels / V.A. Vitrenko, B.S. Vorontsov, I.A Kirichenko // Les technologies modernes de l'industrie mecanique et les problemes de la formation des cadres d'ingenieurs. – Mahdia (Tunisie) UNTD, 2008. – P. 77 – 80. (отримано математичні залежності для моделювання та аналізу накатного інструменту) (іноземне видання).

39. Воронцов Б.С. Современные проблемы оптимизации передач со скрещивающимися осями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, А.Б. Воронцов // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып.107. – С. 41 – 44. (розроблено математичне забезпечення та запропонована методика синтезу передач з осями, що схрещуються) (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

40. Витренко В.А. Особенности изготовления зуборезных долбяков / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. - Вып.117. – С. 27 – 31. (запропоновано нову геометрію зуборізних долбків, основна інструментальна поверхня яких базується на тілі типу «однополостний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

41. Воронцов Б.С. Совершенствование кинематических схем формообранования зубообрабатывающего инструмента / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вып.129. – С. 40 – 45. (зроблено аналіз четвертого типу кінематичної схеми формоутворення третього класу, в основі якого лежить взаємодія оксоїдов

циліндра і тіла, типу «однополостний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

42. Витренко О.С. Вопросы формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №36. – С. 25 – 28. (розроблено принципово нову гвинтову зубчасту передачу з лінійним контактом зубців і передаточним відношенням менше восьми) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

43. Vitrenko A.V. Vytvorenie tvare hyperboloidu šípových ozubených kolies s lineárnou povahou zubov dotyk / A.V. Vitrenko, B.S. Vorontsov, M. Boshanski // Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2013 pri príležitosti 44. výročia založenia Technickej fakulty SPU v Nitre a 20. Medzinárodného stojárskeho veľtrhu v Nitre: zborník vedeckých prac. – Nitra (Slovensko), 2013. – С. 64 – 68. (зроблено аналіз п'яти контакту циліндро-гіперболоїдних зубчастих передач з різним числом зубів) (іноземне видання).

44. Витренко В.А. Разработка технологии изготовления винтовых зубчатых колес на универсальном оборудовании / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Н. Семянная // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вып.139. – С. 33 – 37. (розроблено методику виготовлення зубців на заготовці, типу «однополостний гіперболоїд обертання») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

45. Витренко В.А. Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, И.А. Бочарова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск

«Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №41. – С. 27 – 31. (розроблено математичне забезпечення процесу формоутворення гвинтових зубчастих коліс на стандартному універсальному обладнанні з ЧПУ за допомогою кінцевих фрез) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

46. Антонюк В.Е. Модификация зубчатых зацеплений как средство повышения показателей качества и нагрузочной способности зубчатых передач / В.Е. Антонюк, Б.С. Воронцов, В.Е. Старжинский, В.А. Белый, В.В. Супин // Теория и практика зубчатых передач. – Ижевск (Россия): ИжГТУ, 2014. – С. 285– 301. (розроблено програму автоматизованого розрахунку, що дозволяє здійснювати багатокритерійний інтерактивний синтез передач зацепленням) (іноземне видання).

47. Кривошея А.В. Разработка концепции, структуры и принципов создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач / А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, Н.Э. Тернюк, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко // Вісник Національного Технічного університету "ХП": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2015. – №34(1143). – С. 64 – 74. (розроблено концепцію, структуру і принципи створення і функціонування нової технічної системи синтезу зубчастих зацеплень) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

48. Воронцов Б.С. Совершенствование математических моделей задания и теоретического формообразования зубчатых передач с использованием глобальной сплайн-интерполяции / Б.С. Воронцов, А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, Т. Е. Третьяк // Вісник Національного Технічного університету "ХП": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №25 (1247). – С. 19 – 24. (отримано математичні залежності для узагальненого опису повного профілю зубчастих коліс) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

49. Пат. №25543А. Україна, МКИ F16Н1/08. Зубчата передача / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97041926; заявл. 22.04.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

50. Пат. №25541А. Україна, МКИ В23F1/00. Спосіб обробки бочкоподібних зубців / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052065; заявл. 05.05.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

51. Пат. №29761А. Україна, МКИ В23F1/00, В23F21/00. Спосіб нарізування зубчатих коліс з двовгнутими зуб'ями та інструмент для його здійснення/ Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052444; заявл. 27.05.97; опубл. 15.11.2000; Бюл.№6–II.

52. Пат. №68546. Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс та інструментів / Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М.; заявник і патентовласник Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М. – №u201111822; заявл. 07.10.2011; опубл. 26.03.2012; Бюл.№6.

53. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70762. Комп'ютерна програма «SCOT»/ Б.С. Воронцов, С.Б Воронцов. – №71352; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

54. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70763. Комп'ютерна програма «СОРТеR»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71353; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

55. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70764. Комп'ютерна програма «APACE»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71354; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

56. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70765. Комп'ютерна програма «SAIAT»/ Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова, Д.О. Чаплинський. – №71355; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

57. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70766.

Комп'ютерна програма «COSET»/ Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська, Д.О. Чаплинський. – №71356; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

58. Воронцов Б.С. Проектирование зуборезного инструмента при помощи системы Pro/ENGINEER / Б.С. Воронцов, В.И. Быковский // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения" [Спец.выпуск]: V междунар. науч.-техн. конф. "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века", 8-11 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонГТУ, 1998. - Вып.6, т.1. – С. 166 – 169.

59. Воронцов Б.С. Применение CAD/CAM/CAE/PDM - систем для моделирования тяговых передач / Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: VIII междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1998. – С.57 – 58.

60. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: междунар. науч.-техн. конф. 13 – 18 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Севастополь: Дон ГТУ, 1999.– Т 2. – С. 254 – 257.

61. Ткаченко В.П. Методы твердотельного моделирования зубчатых колес тяговых передач / В.П. Ткаченко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: IX междунар. науч.-техн. конф., 13 – 17 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1999. – С. 12.

62. Бочарова И.А. Твердотельное компьютерное моделирование зубчатых колес с модифицированными зубьями / И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский // Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості: II міжнар. наук.–техніч. конф., 17 – 21 листоп. 2003 р.: тези доп. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – С.16-17.

63. Дорошенко Ю.О. Застосування політканинних перетворень у задачах синтезу зубчастих передач / Ю.О. Дорошенко, Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі: міжнар. наук.-практичної конф., 27 – 29 травня 2004 р.: тези доп. – Ізмаїл,

2004. – С. 112 – 113.

64. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Машиностроение и техносфера XXI века: междунар. науч.-техн. конф., 13 – 18 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2004. – Т.1. – С. 87 – 90.

65. Vorontsov B.S. Improving the efficiency of CAD / CAM / CAE gear systems / B.S. Vorontsov, D.A. Chaplinsky // The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRLUTSTP): VI International Conference, December 2-9, 2007. – Hurghada (Egypt), 2007. – P. 129 – 131.

66. Воронцов Б.С. САПР зубчатых передач / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VI міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2008 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С.20 – 21.

67. Витренко В.А. Гиперболоидный инструмент для нарезания зубьев / В.А. Витренко, Б.С.Воронцов, А.В. Лейба, Д.А. Чаплинский // Машиностроение и техносфера XXI века: XV междунар. науч.-техн. конф., 15-20 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 184 – 188.

68. Воронцов Б.С. Использование программного комплекса Power Solution для изготовления сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VII міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2009 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – С.17 – 18.

69. Витренко В.А. Формообразование зубьев колес гиперболоидных передач/ В.А. Витренко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 4 червня 2010 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С.23.

70. Воронцов Б.С. Использование теории сплайнов при поверхностном моделировании гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов, М.А. Кашура, В.В. Черноволов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX міжнар. наук.-техн. конф., 31 травня – 3 червня 2011 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С.33 – 34.

71. Воронцов Б.С. Исследование схем формообразования накатного инструмента / Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, М.Н. Кузнецова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XI міжнар. наук.-техн. конф., 4 – 6 червня 2013 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С.34.

72. Воронцов Б.С. Формообразование зубчатых колес с линейным характером касания зубьев / Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Машинобудування – очима молодих: міжнар. наук.-техн. конф., 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: тези доп. – Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С.10.

73. Воронцов Б.С. Формоутворення гіперболоїдних фрез / Б.С. Воронцов, В.О. Вітренко, С.Г. Кириченко // Прогресивні технології в машинобудуванні: всеукр. наук.-техн. конф., 10 – 15 лют. 2014 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – С. 19.

74. Воронцов Б.С. Наукові основи технології реінжинірингу зубчастих зачеплень / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Прогресивні технології в машинобудуванні: VI міжнар. наук.-техн. конф., 6 – 10 лют. 2017 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – С. 28 – 30.

75. Pasichnyk V. Reengineering gear based on the model of unified description parameter / V. Pasichnyk, B. Vorontsov // Technika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017): IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 6-9 czerwca 2017. – Rzeszów–Czarna. – P.49.

76. Воронцов Б.С., Автоматизация процессов формообразования при механической обработке сложных поверхностей / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XV міжнар. наук.-техн. конф., 30 травня – 1 червня 2017 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С.17.

ANNOTATION

Vorontsov B.S. Computer-integrated system for providing the formation of gear wheels. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.03.01 - machining processes, machines and tools. - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

In the dissertation work the scientific and technical problem is scientifically substantiated and solved, namely, the quality assurance, first of all, of the kinematic accuracy and smoothness of gear wheels, as well as the reduction of the terms of technological preparation of their production by creating a computer-integrated system, based on which is assigned the unified control parameters that ensure the formation of gear wheels having a different shape of the tooth profile, with the possibility of automated design, interactive control and ualizatsiyi results. The mathematical model of the system of forming the gears was developed, which is based on the generalized representation of the functions of forming, which allowed, in combination with the mathematical model of the machining surface of the gear wheels, to unify the mathematical description and to interactively obtain the output instrumental surface.

The further development of the use of kinematic schemes of form formation of the 3rd class in relation to partial cases, in particular rolling with a slip of hyperboloid on a cylinder and rolling with a slip of hyperboloid in the creeper line, for which the mathematical dependences of the form formation function were obtained, became the basis for the improvement of the tools of the «one-cavity hyperboloid» type.

On the basis of the proposed theoretical and methodological provisions, a computer-integrated system for ensuring the formation of gear wheels was developed. The results of the work were introduced into production, in particular, using the developed computer-integrated system, the profiled and manufactured

hyperboloid tools for the manufacture of gear wheels with a standardized teeth profile.

In the first section, an analysis of the current state of the problem of quality assurance, in the first place, the kinematic accuracy and smoothness of gear gears, the profile of teeth which outlined an arbitrary, not only an involute curve, as well as reduction of the terms of technological preparation of their production.

The basic concept in solving problems of forming is the ideal process - the model of the real process. In developing the ideal formation process, the main factors that affect the shape of the surface to be treated are taken into account. It is believed that the part, the tool and the equipment do not deform and do not wear out, the theoretically precisely fabricated and working elements of the technological system, precisely the adjustment of equipment is carried out, the influence on the formation process of thermal phenomena is not taken into account.

Particular attention is paid to the analysis of the causes of the errors of theoretical shaping and the issues of obtaining geometrically accurate functional surfaces of gear wheels and gear tools, which is practically important for the creation of electronic standards of computer models of these products - the basis of modern computer systems design, analysis, production and control.

It is shown that without solving the problem of accuracy in the theoretical plan at the design stage of the product and the process of its formation, it is impossible to obtain positive results in the process of processing.

Three groups of requirements for a computer-integrated system for providing the formation of gear wheels are formulated and substantiated: to mathematical support (invariance, unity of parameters, minimum sufficiency of control parameters); to structure (modularity, providing interface with CAD / CAM / CAE); to the results (interactive management, visualization of the results). The analysis showed that none of the commercial automation design systems does not fully meet the requirements for computer-integrated systems for ensuring the formation of gear wheels.

It is noted that a large variety of mathematical description of outgoing

contours of creature surfaces for the formation of gear wheels is currently being used. In spite of the fact that engraving gears occupy a significant place in modern mechanisms, for many technical tasks it is more appropriate to use gears with a profile of teeth different from the emulsion. These are gear wheels with Hook Novikov, sinusoidal, cycloid and other gears. Each of these types of gear wheels requires a separate mathematical, methodical and software for the tasks of their shaping and design of the output instrumental surfaces. Therefore, in order to create a computer-integrated form-forming system, mathematical support is required with unified parameters for any type of toothed wheels.

The components that characterize the accuracy of gear wheels are analyzed. This is the kinematic accuracy, smoothness and contact area of the teeth. These components are influenced by various factors associated with all elements of the formation system.

It is noted that the present state of analysis of geometric and kinematic parameters of interacting surfaces allows to represent geometric and kinematic parameters as functions of control parameters of shaped surfaces. This makes it possible to include these indicators in the form-forming system and in an interactive mode to evaluate the effectiveness of the formation process.

In the second section, methods of forming a mathematical model of interactive curve and surface management are developed, which would take into account the possibility of cross-sectional parameterization of the elements of the formation systems, geometric and kinematic indicators, and would facilitate integration with automated systems of design, fabrication, analysis and control.

Interactive control of the formation of functional surface depending on the tasks can be done in two ways: by transforming the space in which the initial curve describing the profile, or the functional surface, and by changing the internal parameters that determine the geometry of the functional surface of the gear wheels.

The mathematical description of the gears' profiles, brought to the universal type on the basis of unified control parameters, provides an approximation of the

point representation of these profiles by splines and provides the basis for the use of unified methodological, algorithmic and software tools for automation of the process of forming, which in aggregate provides both an increase in the accuracy of the description and production of functional surfaces of toothed wheels and a gear tool, and shortens the term of design and technological preparation you development.

In the third section new approaches to the general description of the function of formulation are developed, its mathematical representation is unified and the possibilities of its application are analyzed.

Of particular interest is the classical classification of kinematic schemes of formulation, proposed by Professor P.R. Rodin on its basis, it is possible to develop a generalized mathematical description of the function of forming with the use of control parameters, allowing to go online mode from one type and a class of kinematic schemes to another.

The development of the theory of shaping allows us to expand the possibilities of the interaction of conjugate surfaces and consider new types of formation schemes, on the basis of which you can create tools with improved properties.

A new approach to the generalized description of the function of forming the gears, based on its matrix representation and unified control parameters of the curve that describes the profile of the tooth, proposes a unified mathematical description and implements the interactive control of the structure of the forming system and automates the design of the original instrumental surface.

In the fourth section, mathematical software for describing the geometric and kinematic parameters of contacting the conjugated surfaces as a function of the unified control parameters of the formation system is developed, which allows to realize an interactive analysis of the process of forming the gears.

The mathematical model for complex analysis of the geometric and kinematic parameters of the interaction of the conjugated surfaces has been made possible at the design stage to be analyzed as the conditions for the interaction of

the machined and instrumental surfaces that ensure their production, as well as the conditions of contact of the conjugate teeth of the toothed wheels.

The fifth section proposes the concept of integration of the developed computer-integrated system of providing for formation of gear wheels with CAD / CAM / CAE-systems.

The interactive control of the automated shaping system should be done using unified control parameters that change the shape of the original surface and the kinematic shaping scheme. At the same time, all elements of the system, including the geometric and kinematic parameters of the forming process, are changing at the same time. An interactive analysis of these indicators in the synthesis process serves as feedback and helps to further utilize the experience and knowledge of the designer to quickly evaluate the applicability of the result.

The use of unified parameters allows for the integration of a system of shaping, which includes a preliminary assessment of the geometry and kinematics of the process, in automated systems of design, production, analysis and control.

The sixth section presents the results of the implementation of the work. With the help of mathematical, methodical, algorithmic and software developed in the work, chevron, screw and hyperboloid gears were designed and manufactured, as well as profiled and manufactured hyperboloid tools for machining cylindrical gear wheels.

In the dissertation, as a result of complex researches of the process of formation of gear wheels in the part of interactive control of the shape of the surface, parametrization of the function of shaping for various kinematic schemes, analysis of geometric and kinematic indicators as a process of forming, and processes of interaction of the teeth of gear wheels, a computer-integrated system providing for forming gear wheels, which is based on unified control parameters of the system of forming, its elements, qualitative aznykiv, which enables the development of automated systems to ensure formation of gears and their integration into computer-aided design, manufacturing, analysis and control.

The use of the computer-integrated system has led to a shortening of the

development and improvement of the «single-cavity hyperboloid» gyroscope tool for the treatment of gear wheels.

Key words: machining, gear wheels, shaping, gear machining tools, computer integration, automated design process, interactive control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	32
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС.....	40
1.1. Проблеми і перспективи забезпечення якості зубчастих коліс.....	40
1.1.1. Вимоги до систем забезпечення якості в частині комп'ютерної інтеграції.....	42
1.1.2. Опис вихідного контуру твірної поверхні зубчастих коліс.....	47
1.1.3. Точність зубчастих коліс.....	50
1.1.4. Похибки теоретичного формоутворення.....	52
1.2. Сучасний стан теорії формоутворення зубчастих коліс.....	54
1.3. Використання геометричних та кінематичних показників для аналізу якості процесу формоутворення зубчастих коліс.....	60
1.4. Значення електронних еталонів при формоутворенні зубчастих коліс.....	63
1.4.1. Використання електронних еталонів при формоутворенні зубчастих коліс на верстатах с ЧПК.....	63
1.4.2. Адитивні технології.....	66
1.4.3. Використання електронних еталонів при контролі точності готових зубчастих коліс.....	68
Висновки, мета і задачі.....	71
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРУВАННЯ ФОРМОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАТИХ КОЛІС НА ОСНОВІ УНІФІКОВАНИХ КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ.....	74
2.1. Методи керування формою кривих за допомогою керуючих елементів.....	74
2.2. Видозміна геометрії кривих і поверхонь шляхом перетворення простору.....	80
2.3. Видозміна геометрії кривих і поверхонь шляхом зміни внутрішніх	

	29
параметрів.....	85
2.4. Апроксимація кривими Безьє 3-го порядку.....	96
2.5. Формоутворення функціональних поверхонь на основі уніфікованих керуючих параметрів.....	101
2.6. Внутрішня геометрія функціональних поверхонь.....	107
Висновки до розділу 2.....	112
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕНИЙ ОПИС ФУНКЦІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС.....	114
3.1. Кінематичні схеми формоутворення 3-го класу.....	114
3.1.1. Третій тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу.....	114
3.1.2. Четвертий тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу.....	117
3.1.3. П'ятий тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу.....	126
3.1.4. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс і інструментів.	128
3.2. Зв'язки огинання.....	129
3.3. Побудова функціональної поверхні.....	140
3.4. Аналіз ліній контакту і умов обкатки.....	149
3.4.1. Лінії контакту.....	149
3.4.2. Функціональні обмеження передач з перехресними осями.....	152
3.4.3. Умови підрізання зубців.....	154
3.5. Кінематичні схеми формоутворення 2-го класу.....	156
3.5.1. Перетворення координат кінематичних схем формоутворення 2-го класу.....	156
3.5.2. Зв'язки огинання для схем формоутворення 2-го класу.....	160
3.5.3. Параметри поверхонь зубців нарізуваних коліс.....	162
3.5.4. Інтерактивне керування процесом формоутворення для кінематичних схем формоутворення 2-го класу.....	164
Висновки до розділу 3.....	167
РАЗДЕЛ 4. ГЕОМЕТРИЧНІ ТА КІНЕМАТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ.....	169

4.1. Аналіз відносної швидкості ковзання поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення.....	170
4.2. Аналіз кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній.....	174
4.3. Аналіз сумарної швидкості переміщення точок контакту поверхонь, що беруть участь у процесі формоутворення.....	178
4.4. Коефіцієнти питомих ковзань.....	188
4.5. Приведена кривизна в перпендикулярному до лінії контакту напрямку.....	190
4.6. Геометричні та кінематичні показники замкненої системи.....	195
4.6.1. Відносна швидкість ковзання робочих поверхонь.....	196
4.6.2. Сумарна швидкість переміщення точок контакту в перпендикулярному до лінії контакту напрямку	198
4.6.3. Коефіцієнти питомих ковзань.....	204
4.6.4. Кут між відносною швидкістю і напрямком лінії контакту.....	205
4.6.5. Приведена кривизна поверхонь зубців в перпендикулярному до лінії контакту напрямку	206
4.6.6. Функціональні обмеження при формоутворенні зубчастих коліс...	210
Висновки до розділу 4.....	213
РОЗДІЛ 5. КОМП'ЮТЕРНА ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС.....	215
5.1. Комп'ютерно-інтегрована система, як засіб інформаційного забезпечення конструкторсько-технологічних етапів життєвого циклу зубчастих передач.....	216
5.2. Методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс.....	223
5.2.1. Програмне забезпечення «СОРТеR» для керування простором шляхом політканинних перетворень.....	223
5.2.2. Програмне забезпечення «COSET» для керування формою	227

складної поверхні.....	
5.2.3. Програмне забезпечення «APACE» для апроксимації масиву точок кривими Безьє 3-го порядку.....	232
5.2.4. Програмне забезпечення «SCOT» для визначення контактних точок функціональних поверхонь.....	235
5.2.5. Програмне забезпечення «SAIAT» для комплексного параметричного моделювання систем і процесів формоутворення.....	238
5.3. Інтеграція з системами CAD/CAM/CAI.....	239
5.3.1. Інтеграція з CAD-системами.....	239
5.3.2. Електронні еталони при механічному обробленні зубчастих коліс традиційними методами.....	256
5.3.3. Інтеграція з CAM-системами.....	259
5.3.4. Адитивні технології.....	264
5.3.5. Інтеграція з CAI-системами.....	265
Висновки до розділу 5.....	273
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	275
6.1. Виготовлення зубчастих коліс і зубообробного інструменту.....	275
6.1.1. Виготовлення гіперболоїдних коліс.....	275
6.1.2. Виготовлення гіперболоїдних фрез.....	288
6.1.3. Особливості виготовлення зуборізних довбачів.....	291
6.1.4. Технологічні особливості виготовлення гіперболоїдного інструмента для фінішної обробки зубчастих коліс.....	299
6.1.5. Виготовлення та використання гіперболоїдних накатників.....	303
6.2. Практична реалізація на промислових підприємствах України.....	309
6.3. Практична реалізація в навчальному процесі.....	310
Висновки до розділу 6.....	310
ВИСНОВКИ.....	312
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	315
ДОДАТОКИ.....	350

ВСТУП

Актуальність теми. Експлуатаційні можливості багатьох видів технічної продукції значною мірою залежать від точності деталей і вузлів, в тому числі зубчастих передач. Ступінь точності передач визначається нормами кінематичної точності, плавності роботи та контакту зубців, які в свою чергу залежать від точності профілю, що визначає функціональні поверхні зубчастих коліс. Сучасний стан теорії формоутворення зубчастих коліс, а особливо тих, у яких профіль зуба відрізняється від евольвентного, вже на рівні ідеального процесу формоутворення вносить істотну похибку в формоутворення профілю. Це викликано тим, що при створенні інструменту з економічних і технологічних міркувань теоретично точна інструментальна поверхня замінюється наближеною.

Застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій дозволяє забезпечити високу точність формоутворення функціональних поверхонь зубців зубчастих коліс, прискорити процеси їх проектування, виготовлення і контролю. Для цього слід розробити таку систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, яка мала б єдине математичне забезпечення, яке дозволить змінювати профіль зубців і форму спряжених з ними поверхонь в інтерактивному режимі, варіювати параметрами функції формоутворення для вибору інструментальної поверхні, що забезпечує точність профілю зубців зубчастих коліс, дозволить аналізувати умови контактування спряжених поверхонь, матиме єдиний інтерфейс з системами CAD/CAM/CAE, що, в свою чергу, дозволить повною мірою використовувати можливості сучасного обладнання з ЧПК та координатно-вимірювальних машин для виготовлення і контролю зубчастих коліс на основі отриманих електронних еталонів коліс та інструментів.

Тому скорочення термінів проектування та підвищення точності зубчастих коліс шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи, яка забезпечує автоматизоване проектування вихідної інструментальної поверхні для формоутворення зубчастих коліс, незалежно від форми профілю зубців та

виключення на рівні ідеального процесу формоутворення одного з головних чинників, що впливає на похибку профілю, є актуальною науково-практичною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана відповідно з Державними науково-технічними програмами по розділу 04. “Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології“, а також згідно з науковими планами Міністерства освіти і науки України в Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля по держбюджетним темам «Теоретичні дослідження процесів плазмової, віброабразивної і гідроабразивної обробки, комп'ютерний синтез оптимальних технологічних середовищ» (номер держреєстрації 0104U000100), «Створення гіперболоїдних зубчастих передач другого роду з лінійним контактом зубців» (номер держреєстрації 0105U000893), «Створення високонавантажених зубчастих передач локомотивів з лінійним контактом зубців» (номер держреєстрації 0111U000034), «Розробка інноваційного інструментарію створення високоефективного вантажного вагона, як основа формування конкурентних переваг транспортних коридорів України» (номер держреєстрації 0116U004160), «Створення багатофункціональних наукомістких методів енергетичного управління інженерією поверхонь контакту «колесо-рейка» для забезпечення еколого-ефективної передачі потужності» (номер держреєстрації 0117U000561) та в КПІ ім. Ігоря Сікорського по держбюджетній темі «Інноваційні технології та верстатно-інструментальне оснащення високопродуктивної обробки різанням сучасних конструкційних матеріалів» (номер держреєстрації 0117U000492).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва на базі нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі

задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс в частині розвитку підходів до математичного опису функціональних поверхонь зубців та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх формоутворення, та інтеграції з сучасними комп'ютерними технологіями проектування та виробництва.

2. Розробити комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс на основі уніфікації керуючих параметрів її елементів.

3. Розробити математичне забезпечення опису форми зубців зубчастих коліс, вихідних інструментальних поверхонь, геометричних і кінематичних показників процесу формоутворення на базі уніфікованих керуючих параметрів.

4. Реалізувати можливість інтерактивного керування формотвірними кривими лініями, що утворюють функціональні поверхні зубчастих коліс, забезпечити параметризацію елементів системи формоутворення зубчастих коліс, геометричних і кінематичних показників на базі єдиних уніфікованих керуючих параметрів, інтеграцію з автоматизованими системами проектування, виготовлення, аналізу та контролю.

5. Розробити нові підходи до узагальненого опису параметрів функції формоутворення, уніфікувати її математичне подання та проаналізувати можливості часткових випадків кінематичної схеми формоутворення 3-го класу для удосконалення інструменту.

6. Розробити математичне забезпечення для опису геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, як функцію від уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення, що дозволяє візуалізувати результати аналізу процесу формоутворення зубчастих коліс.

7. Розробити нові методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення, які в поєднанні реалізують комп'ютерно-інтегровану систему

забезпечення формоутворення зубчастих коліс, впровадити їх у виробництво та у навчальний процес.

Об'єкт дослідження – автоматизований процес проектування систем формоутворення функціональних поверхонь зубчастих коліс.

Предмет дослідження – функціонально-параметричні зв'язки елементів формоутворюючих систем та автоматизація етапів їх проектування.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження здійснювалися на основі наукових положень теорії формоутворення, методів диференціальної геометрії та теорії поверхонь, теорії сплайнів, методів деформаційного конструювання геометричних об'єктів.

Для перевірки адекватності математичного забезпечення використані методи поверхневого і твердотільного комп'ютерного моделювання за допомогою сучасного програмного забезпечення провідних компаній-розробників з подальшим виготовленням і контролем деталей зі складними робочими поверхнями за еталонними комп'ютерними моделями.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вперше на основі системного аналізу ідеальних процесів формоутворення запропоновано новий підхід до вирішення завдання забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва, що базується на новій комп'ютерно-інтегрованій системі, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри, що забезпечують формоутворення зубчастих коліс, які мають різну форму профілю зуба, з можливістю автоматизованого проектування, інтерактивного керування та візуалізації результатів досліджень. Для цього вперше:

1. Розроблено математичну модель для опису оброблювальної поверхні зубчастих коліс, в основу якої покладено математичні залежності, що дозволяють інтерактивно керувати формою зубців зубчастих коліс шляхом перетворення простору разом з залежною від нього поверхнею

зубців та зміни внутрішніх параметрів, що визначають профіль зуба зубчатого колеса. Це створило умови для розробки комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс, побудованої на єдиних уніфікованих керуючих параметрах.

2. Розроблено математичну модель та визначено порядок використання її елементів для уніфікації опису вихідного контуру твірної поверхні, що забезпечується апроксимацією його точкового подання у виді сплайну, представленого кривими Безьє 3-го порядку, з уніфікованими керуючими параметрами, що дозволило створити систему формоутворення на єдиній параметричній базі не залежно від форми профілю зубчастих коліс.

3. Розроблено математичну модель системи формоутворення зубчастих коліс, в основу якої покладено новий підхід до узагальненого опису функції формоутворення, заснований на матричному представленні, суть якого полягає в тому, що перехід від системи координат оброблюваної поверхні до системи координат інструментальної поверхні здійснюється за допомогою добутку єдиного набору елементарних матриць четвертого порядку, кожна з яких характеризує лише один елементарний поступальний або обертальний рух між сусідніми ланками та визначається одним параметром, який узгоджується з формотвірними чинниками цього руху, а перехід від одного класу кінематичної схеми формоутворення до іншого відбувається обнуленням параметра відповідної матриці, що дозволило в сукупності з математичною моделлю оброблювальної поверхні зубчастих коліс уніфікувати математичний опис та інтерактивно отримувати вихідну інструментальну поверхню.

4. Отримали подальший розвиток теоретичні положення щодо використання кінематичних схем формоутворення 3-го класу стосовно часткових випадків, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій, для яких одержано математичні залежності функції формоутворення, що стало основою вдосконалення інструментів типу «однопорожнинний гіперболоїд».

5. Розроблено математичну модель для комплексного аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, яка базується на математичних залежностях, в основу яких покладені уніфіковані керуючі параметри, що дозволило ще на стадії проектування аналізувати як умови взаємодії оброблюваних та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх виготовлення, так і умови контактування спряжених зубців зубчастих коліс.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичних та методологічних положень розроблено комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, яка включає такі модулі, захищені свідоцтвами авторських прав на твір (№ 70762, № 70763, № 70764, № 70765, № 70766): «APACE»©, що реалізує перетворення заданого математичного опису геометрії поверхонь зубців зубчастих коліс до єдиного функціонального виду; «COPTeR»© і «COSET»©, що реалізують можливості інтерактивної зміни геометрії зубчастих коліс за допомогою перетворень простору і безпосередньо за допомогою керуючих уніфікованих елементів кривих, відповідно; «SCOT»©, що дозволяє синтезувати контактні точки робочого і верстатного зачеплень та експортувати їх в CAD-системи; «SAIAT»©, що дозволяє на підставі аналізу геометричних і кінематичних показників в точках контакту спряжених поверхонь в інтерактивному режимі синтезувати інструментальні поверхні і поверхні зубців зубчастих коліс.

З використанням комп'ютерно-інтегрованої системи спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для виготовлення зубчастих коліс з уніфікованим профілем зубців. На прикладі шевронних і гвинтових зубчастих коліс підтверджена можливість розробки еталонних комп'ютерних моделей з поліпшеним профілем зубців, відмінним від евольвентного та аналізу в системі Autodesk© PowerMill© процесу симуляції керуючих програм з подальшим виготовленням цих коліс на верстаті з ЧПК. Спроектвані та виготовлені із застосуванням адитивних технологій шевронні зубчасті колеса з профілем зубців, отриманим за допомогою

розробленого програмного забезпечення з відповідним інженерним аналізом.

Запропоновані і запатентовані (патенти України №25543А, №25541А, №29761А, №68546) зубчасті передачі та нові способи формоутворення зубчастих коліс і зубооброблювальних інструментів, що дозволяють підвищити ефективність виготовлення циліндричних і гіперболоїдних коліс з уніфікованим профілем і поліпшеними геометричними та кінематичними показниками.

Результати роботи впроваджено у виробництво, зокрема на ДП «ЛОРТА» концерну «Укроборонпром», ТОВ «НДІ «Редуктор» та у навчальний процес СНУ ім. Володимира Даля та КПІ ім. Ігоря Сікорського, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати отримані здобувачем самостійно. Здобувач здійснив наукове обґрунтування розробок в області формоутворення зубчастих коліс, що забезпечує вирішення важливої науково-практичної проблеми - забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих передач, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва на базі нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Постановка завдань і аналіз наукових результатів виконані разом з науковим консультантом і, частково, зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах: VIII, IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми розвитку рейкового транспорту», 1998, 1999, Алушта-Луганськ; II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості», 2003, Миколаїв; V, VI, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Машинобудування і техносфера XXI століття», 1998, 1999, 2004; 2008, Севастополь; Міжнародній науково-

практичній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі», 2004, Ізмаїл; VI International Conference «The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRLUTSTP)», 2007, Hurghada (Egypt); VI, VII, VIII, IX, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Важке машинобудування. Проблеми і перспективи розвитку», 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2017, Краматорськ; Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування – очима молодих», 2013, Кременчук; III, VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивні технології в машинобудуванні», 2014, 2017, Львів; IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «Tecnika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017)», 2017, Rzeszów–Czarna (Polska).

Результати роботи доповідалися на міжнародному науковому семінарі по зубчастих передачах 13-14 грудня 2012 року в м. Гомель (Білорусь).

Дисертація в повному обсязі доповідалась на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» 6-10 лютого 2017 р, м. Львів та Міжнародній науково-технічній конференції ЗП-2017 «Проблеми якості та довговічності зубчастих передач і механічного приводу» 25-30 серпня 2017 р, м. Одеса.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 76 наукових робіт, в тому числі 48 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 патенти на корисну модель, 5 свідоцтв про авторські права на твір (програмне забезпечення), 19 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 397 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 268 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями та 149 рисунками. Список використаних джерел містить 291 найменування, з них 269 кирилицею та 22 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

Забезпечення якості зубчастих коліс – результат комплексного впливу теоретичного формоутворення, яке включає проектування самого виробу, проектування процесу його формоутворення (кінематична схема формоутворення, вихідна інструментальна поверхня, різальний інструмент) і реалізації процесу формоутворення.

Для визначення перспективних напрямків розвитку завдань із забезпечення якості формоутворення зубчастих коліс необхідно проаналізувати вимоги до систем забезпечення якості зубчастих коліс, сучасний стан теорії формоутворення зубчастих коліс, геометричні та кінематичні показники якості процесу формоутворення, застосування комп'ютерних технологій в задачах синтезу і аналіз процесу формоутворення функціональних поверхонь зубчастих коліс.

1.1. Проблеми і перспективи забезпечення якості зубчастих коліс

В роботі [223] відмічається, що «при різноманітних способах виготовлення деталей процес формоутворення заданої поверхні полягає у взаємодії заготовки та інструмента, які здійснюють певні рухи відповідно до прийнятої схеми оброблення. Тому форма оброблюваної поверхні деталі визначатиметься формою та розміром робочих поверхонь інструмента та його рухами відносно заготовки. Процес, який розглядається, ускладнюються супровідними явищами. До них належать: деформації деталі, інструменту та обладнання; похибки інструменту, пристроїв, обладнання; зношування елементів технологічної системи; похибки вимірювань, настроювання обладнання; температурні деформації заготовки, обладнання та інструментів; вібрації при обробленні тощо. Тобто при формуванні оброблюваної поверхні

деталі основний процес не може бути реалізований в чистому вигляді, а супроводжується всілякого роду суміжними явищами, і тільки в результаті їх взаємодії визначається реальна форма оброблюваної поверхні деталі. Вивчити цей процес з урахуванням всіх факторів, що діють одночасно, та їх взаємного впливу важко».

Базовим поняттям у вирішенні завдань формоутворення є «ідеальний процес – модель реального процесу. При розробленні ідеального процесу формоутворення враховуються основні фактори, які впливають на форму оброблюваної поверхні виробу, а саме: рухи, які виконуються в процесі обробки інструментом та заготовкою, форма і розміри поверхонь інструмента, що безпосередньо торкаються матеріалу заготовки і формують оброблену поверхню. Вважається, що деталь, інструмент та обладнання не деформуються і не зношуються, теоретично точно виготовлені і працюють елементи технологічної системи, точно здійснюється налагоджування обладнання, не враховується вплив на процес формоутворення теплових явищ.

Ідеальний процес формоутворення практично не можна реалізувати, але його аналіз надає практиці значну допомогу. На основі дослідження ідеальних процесів, як показує практика машинобудування, створюються нові прогресивні методи оброблення, нові типи інструментів та обладнання.

В практиці на основі розробленого ідеального процесу створюється реальний процес. Реальний процес вивчається з урахуванням усіх взаємодіючих факторів, найчастіше експериментально, і в нього, якщо це необхідно, вносяться відповідні корективи» [223].

Створення комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс дозволить вже на стадії проектування виключити похибки, викликані помилками теоретичного формоутворення профілю зубців.

Таким чином, не вирішивши питання забезпечення точності в теоретичному плані на етапі проектування виробу і процесу його формоутворення, неможливо отримати позитивні результати в процесі обробки.

Ключовим елементом, що зв'язує всі етапи є вибір і обґрунтування схеми формоутворення, для якої слід шукати можливість керування її параметрами.

Таким чином, зв'язки елементів системи забезпечення точності формоутворення зубчастих коліс для ідеального процесу можуть бути представлені у вигляді (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Зв'язки елементів системи забезпечення точності формоутворення зубчастих коліс для ідеального процесу

1.1.1. Вимоги до систем забезпечення якості в частині комп'ютерної інтеграції

Якщо говорити про комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, як про безальтернативний інструмент підвищення ефективності проектних процедур, то спираючись на фундаментальні роботи [145], [176], [185], [190], сформулюємо і обґрунтуємо вимоги до такої системи.

Вимоги слід розділити на три групи:

1. До математичного забезпечення;
2. До структури;
3. До результатів.

Група вимог до математичного забезпечення повинна включати:

Вимога інваріантності.

Система повинна бути незалежною від геометрії профілю зубців зубчастих коліс, та мати можливість бути застосованою до будь-якого зачеплення, що взаємно огинається (точного).

Дана вимога дасть можливість трансформації геометрії профілю зубців без зміни моделі їх опису і методів подальшого аналізу.

Вимога єдності параметрів.

Математичне забезпечення кожного елемента системи повинне залежати від єдиного набору параметрів.

Дана вимога дасть можливість виключити додавання/виключення додаткових/надлишкових параметрів на різних етапах роботи системи, що забезпечує вертикальну інтеграцію системи.

Вимога мінімальної достатності керуючих параметрів.

Кількість керуючих параметрів має бути мінімальною, але достатньою.

Дана вимога дасть можливість забезпечити результативність процесу проектування при мінімальних витратах на визначення параметрів системи.

Група вимог до структури системи повинна включати:

Вимога модульності.

Система повинна забезпечувати можливість підключення модулів, які вирішують нові завдання.

Дана вимога дасть можливість розширення системи вглиб (удосконалення модулів), по горизонталі (розширення набору модулів) і по вертикалі (модулі для вирішення завдань інших етапів життєвого циклу виробу).

Вимога забезпечення інтерфейсу з CAD/CAM/CAE.

Система повинна забезпечувати двосторонню інформаційну взаємодію з системами CAD/CAM/CAE.

Дана вимога дозволить використовувати можливості сучасних систем CAD/CAM/CAE для введення вихідних даних, для проміжних трансформацій, для представлення та аналізу результатів.

Група вимог до результатів повинна включати:

Вимога інтерактивної керованості.

Система повинна забезпечувати проектувальнику можливість інтерактивного впливу на керуючі параметри системи.

Дана вимога дасть можливість в режимі реального часу аналізувати вплив параметрів проектування на результати.

Вимога візуалізації результатів.

Система повинна дати проектувальнику можливість швидкої візуальної оцінки результатів.

Дана вимога дозволить додатково використовувати досвід і знання проектувальника для швидкої оцінки прийнятності результатів.

Різноманіття різних класів, типів і видів зубчастих коліс, розширення сфер застосування та призначення, необхідність підвищення функціональних, експлуатаційних, енергетичних, економічних, екологічних (шум і вібрації) і масогабаритних показників вимагає розробки досконаліших підходів до створення технічних систем їх синтезу та інформаційних технологій підтримки етапів їх життєвого циклу. Тому створення нової технічної системи синтезу зубчастих коліс різних класів, типів і видів з урахуванням їх життєвого циклу і з використанням наукоємних процесів, більш досконалих математичних моделей та інформаційних технологій їх підтримки є актуальним завданням вітчизняного машинобудування.

Існуючі інформаційні технології синтезу зубчастих коліс ґрунтуються в основному на стандартних методиках теоретичного і технологічного синтезу застосовуються для деяких етапів життєвого циклу окремих класів, типів і видів зубчастих коліс або зв'язують деякі етапи їх життєвого циклу. Існуючі пакети синтезу деяких етапів життєвого циклу зубчастих коліс значно обмежені ГОСТами, стандартними методиками розрахунку, відомими класифікаціями, відомими способами теоретичного і технологічного синтезу, способами оброблення, технічними засобами контролю, точністю складання, умовами експлуатації, способами ремонту і т. і.

Є окремі системи, створені компаніями, які роблять зубообробні верстати: «LTCA» компанії Gleason, «KIMOS» компанії Klingelnberg, саратовська «ВОЛГА-5» (тут мова лише про системи, які є програмними продуктами). Відсутність CALS-технологій для синтезу зубчастих коліс пояснюється, швидше за все, не тільки відсутністю фінансування або математичною і логічною складністю, а й тим, що в області пошуку оптимальних варіантів синтезу вкрай обмежені, а методи і математичні моделі теорії зачеплень не завжди відповідають вимогам, що висуваються до них замовниками і розробниками програмного забезпечення.

Існуючі інформаційні технології (CATIA, CREO, Unigraphics, PowerSOLUTION, SolidWorks, та ін.) використовуються на етапах проектування і виробництва різних машин і механізмів, а також системи:

- CAE (Computer Aided Engineering) – системи автоматизованого інженерного аналізу деталей та машин (MSC Nastran, Ansys, LS-DYNA3D, APM WinMachine та ін.);
- PDM (Product Data Management) – системи автоматизованого керування базами даних про виріб (IMAN, Optegra, Enovia та ін.);
- Project Management – автоматизовані системи керування процесом проектування і системи планування (WorkFlow, DocFlow і Project Planing);
- MRP (Material Requirements Planning) – автоматизовані системи керування виробництвом (SAP R/3, BAAN, Галактика та ін.).

CAD/CAM системи не задовольняють повною мірою завданню теоретичного забезпечення формоутворення зубчастих коліс в нашій постановці.

Ці системи можна використовувати для вдосконалення деяких етапів життєвого циклу зубчастих коліс, однак вони розраховані на широкий клас деталей і не враховують багато особливостей життєвого циклу і синтезу зубчастих коліс.

Аналіз того, в якій степені сучасні провідні системи автоматизованого проектування відповідають встановленим вимогам в частині вирішення задач теоретичного забезпечення формоутворення зубчастих коліс наведено у табл. 1.1

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз систем CAD/CAM/CAE

Група	Вимога	CATIA	Creo/Parametric	Inventor	PowerShape	SolidWorks	KOMPIAC	MSC Nastran	ANSYS	LS-DYNA3D	APM WinMachine
Математичне забезпечення	1. Інваріантність	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2. Єдність параметрів	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3. Мінімальна достатність керуючих параметрів	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Структура	4. Модульність	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	5. Інтерфейс з CAD/CAM/CAE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Результати	6. Інтерактивна керованість	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	7. Візуалізація результатів*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/+

*В частині аналізу геометричних та кінематичних показників якості формоутворюючої системи.

Табл. 1.1 показує, що жодна з комерційних систем автоматизованого проектування не відповідає повною мірою вимогам до комп'ютерно-інтегрованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс, а отже їх використання для задач автоматизованого синтезу інструментальних поверхонь і аналізу процесу формоутворення не є максимально ефективним, тобто, вони можуть ефективно вирішувати задачі окремих етапів, наприклад,

проектування електронного еталону зубчастого колеса, аналіз напружень елементів зубчатих коліс, аналіз працездатності інструменту для виготовлення зубчастих коліс, але весь комплекс задач вони не охоплюють. Тому актуальним є питання реалізації комп'ютерно–інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс, яка б повною мірою відповідала вимогам.

У той же час розвиток теорії технічних систем, досягнення вітчизняних і зарубіжних вчених в області завдання, редагування або модифікації поверхонь зубчастих коліс, теорії зачеплень, геометричного і кінематичного синтезу, формоутворення поверхонь різанням, технології виготовлення, складання, умов експлуатації, розрахунків згинальної та контактної міцності і довговічності, динаміки зубчастих коліс, розрахунків на «гаряче» і «холодне» заїдання, досягнення сучасного матеріалознавства, в тому числі в області надтвердих матеріалів, сучасний математичний апарат (теорія відображення афінного простору, теорія множин, бульова алгебра), сучасні комп'ютерні системи, верстатне обладнання та вимірювальна техніка дозволяють приступити до розробки нової технічної системи життєвого циклу зубчастих коліс і безперервної інформаційної підтримки етапів її життєвого циклу. Весь цей комплекс накопичених знань, досягнень науки, наукоємних процесів і сучасних технічних засобів дозволяє значно розширити область пошуку оптимальних етапів життєвого циклу зубчатих коліс і реалізувати його оптимальний варіант.

1.1.2. Опис вихідного контуру твірної поверхні зубчастих коліс

Для визначення геометричних параметрів зуба евольвентних зубчастих коліс використовується стандартний вихідний контур (рис. 1.2).

«Стандартний вихідний контур профілю зуба – профіль зуба зубчастої рейки, що його використовують як основу для визначення стандартних розмірів зуба системи евольвентних зубчастих коліс» [207].

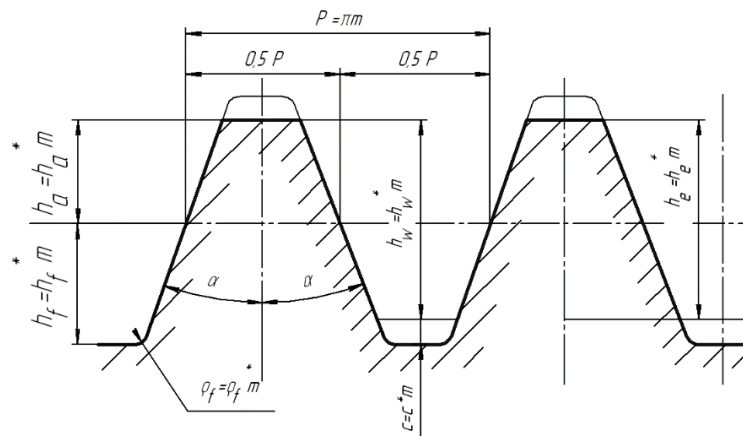


Рис. 1.2. Вихідний контур по ГОСТ 13755-81 [191]

Маючи ряд переваг, евольвентні зубчасті колеса часто не є переважними за деякими експлуатаційними характеристиками, наприклад, таким, як навантажувальна здатність, зносостійкість і т.і. Тому були розроблені інші вихідні контури, такі, як вихідні контури для коліс з зачепленням Новікова (рис.1.3.) [115], [164], [166], [189], [193] синусоїдальні (рис.1.4) [5], [119] та інші вихідні контури. Роботи з дослідження та розробки нових вихідних контурів для формоутворення зубців зубчастих коліс тривають і в даний час.

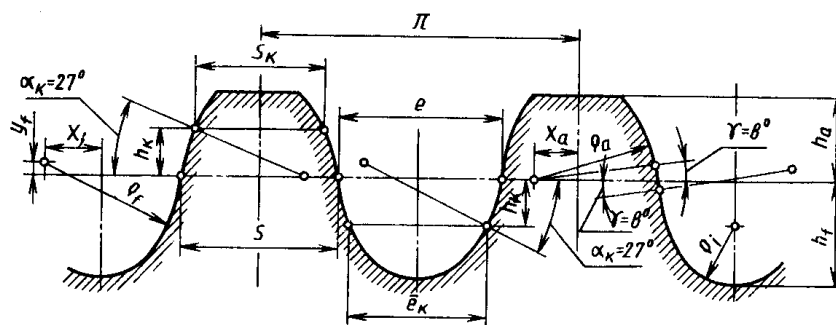


Рис.1.3. Вихідний контур по ГОСТ 15023-76 [208]

Класифікація існуючих вихідних контурів приведена на рис. 1 роботи [25]. Як видно з цього малюнка, інструментальна поверхня, що відповідає обраному виду зачеплення, залежить від математичного опису вихідного контуру твірної поверхні. В роботі [107] наведено класифікацію кривих та їх математичний опис. При великій різноманітності такого опису стає складним створення універсальної системи формоутворення зубчастих коліс.

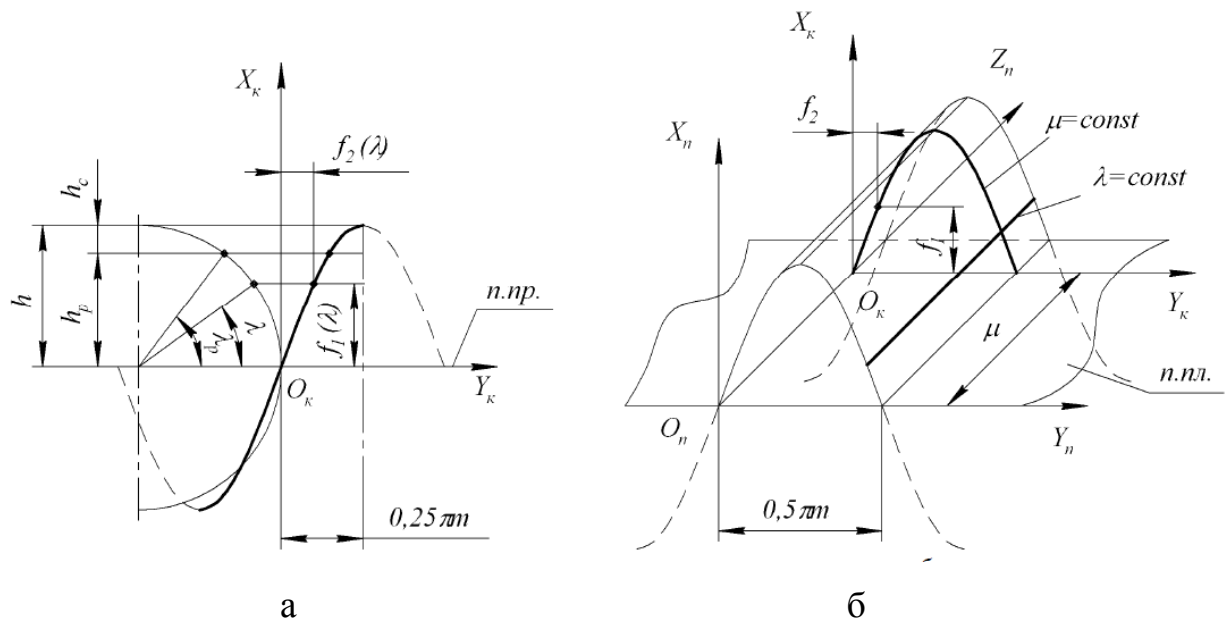


Рис. 1.4. Основні параметри твірної поверхні та системи координат:

а – синусоїдальний вихідний контур;

б – твірна поверхня синусоїдальних коліс [251]

Для дотримання вимог до інваріантності, єдності параметрів, мінімальної достатності керуючих параметрів необхідно вибрати такий математичний апарат, який би дозволив переходити від одного вихідного контуру до іншого тільки за рахунок керування уніфікованими параметрами.

За керованою варіацією форми вихідного контуру найбільшою мірою відповідають:

1) перетворення простору, в яке поміщений вихідний контур і зміна цього простору разом з контуром за допомогою керуючих параметрів щодо незмінного простору [127], [210];

2) зміна керуючих параметрів кривих, що описують вихідний контур в незмінному просторі, тим самим отримуючи необхідну форму вихідного контуру. В цьому випадку особливий інтерес представляють сплайни [3], [243], [272], [276], [287].

1.1.3. Точність зубчастих коліс

Вимоги до точності виготовлення зубчастих коліс безпосередньо пов'язані з коловою швидкістю їх експлуатації. При недостатній точності і високій окружній швидкості зубчасті колеса працюють зі значним шумом, а зубці відчувають додаткові динамічні навантаження. Тому всі параметри евольвентних зубчастих коліс чітко позначені в ГОСТ 1643-81 для циліндричних і ГОСТ 1758-81 для конічних коліс. Встановлено 12 ступенів точності: від 1-ї до 12-ї в порядку зменшення точності. Необхідна ступінь точності визначається призначенням машини і умовами роботи зубчастих коліс (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Взаємозв'язок ступеня точності та колової швидкості [253]

Ступень точності	Швидкість для прямозубих коліс, м/с	Швидкість для косозубих коліс, м/с
4, 5	>15	>30
6	до 15	до 30
7	до 10	до 15
8	до 6	до 10
9	до 2	до 4

Для кожного ступеня точності встановлені норми кінематичної точності, плавності роботи і контакту зубців.

Кінематична точність характеризується найбільшою похибкою передавального відношення за один оберт колеса, тобто, різницею між фактичним і розрахунковим кутами повороту веденого колеса за один оборот.

Плавність роботи характеризується коливаннями кутової швидкості колеса в межах одного оберту. Обумовлюється помилками в кроці і профілі та впливає на силу ударів і шум в зубчастих колесах.

Норми контакту характеризуються плямою контакту зубців, тобто, концентрацією навантаження на зубцях. Вони визначаються точністю виконання профілю зубців і впливають на працездатність силових зубчастих коліс. Зазначені норми для кожного ступеня точності наведені в стандартах.

Однак, для ступенів точності 1 і 2 (евольвентна циліндрична передача) і 1, 2 і 3 (евольвентна конічна передача) допуски вже багато десятиків років не встановлені.

Ці ступені точності вважалися перспективними ще в першій половині минулого століття в надії на те, що з розвитком теорії формоутворення робочих поверхонь зубчастих коліс і нових технологій їх виробництва, можна буде досягти найвищого ступеня точності і, відповідно, значно розширити експлуатаційні можливості зубчастих коліс.

Для інших видів зачеплень точність зубчастих коліс визначається, в більшості випадків, нормами підприємств, іноді використовуються рекомендації НДІ. Так для зубчастих коліс Новікова з двома лініями зачеплення, що відповідають вихідному контуру за ГОСТ 15023-76 (або близькому контуру до нього), ЦНДІТМАШ рекомендує чотири класи норм точності зубчастих коліс, що позначаються в порядку зменшення точності: НД-1, НД-2, НД-3 і НД-4, які, з точки зору технологічних вимог, знаходяться на рівні відповідно 6-9-го ступеня точності по ГОСТ 1643-81.

Для зубчастих коліс з низькими вимогами до точності зачеплення в поле допуску потрапляють навіть змішані зачеплення. Так, при перепрофілюванні, евольвента може замінюватися прямою лінією або синусоїдою.

Евольвентні зубчасті колеса 4-го ступеня точності вважаються прецизійними і для їх виготовлення вже потрібні особливі умови проектування і формоутворення. Для зубчастих коліс, відмінних від евольвентних, це завдання ускладнюється на порядок. Цим пояснюється стримування широкого впровадження перспективних зубчастих коліс і зубообробного інструменту.

Для уникнення додаткових навантажень великі швидкості вимагають значного підвищення точності виготовлення зубчастих коліс. При високій якості виготовлення колова швидкість може досягати 120-150м/сек [182].

1.1.4. Похибки теоретичного формоутворення

Найбільше застосування серед існуючих методів нарізування циліндричних зубчастих коліс знайшли методи зубофрезерування черв'ячними фрезами, які найбільш продуктивні завдяки особливостям конструкції і роботи цього інструменту.

На даному етапі теорії формоутворення зубчастих коліс обертальний рух черв'ячної фрези зводиться до поступально-прямолінійного руху рейки, яка замінює собою фрезу (заміна 3-го класу кінематичної схеми на 2-й).

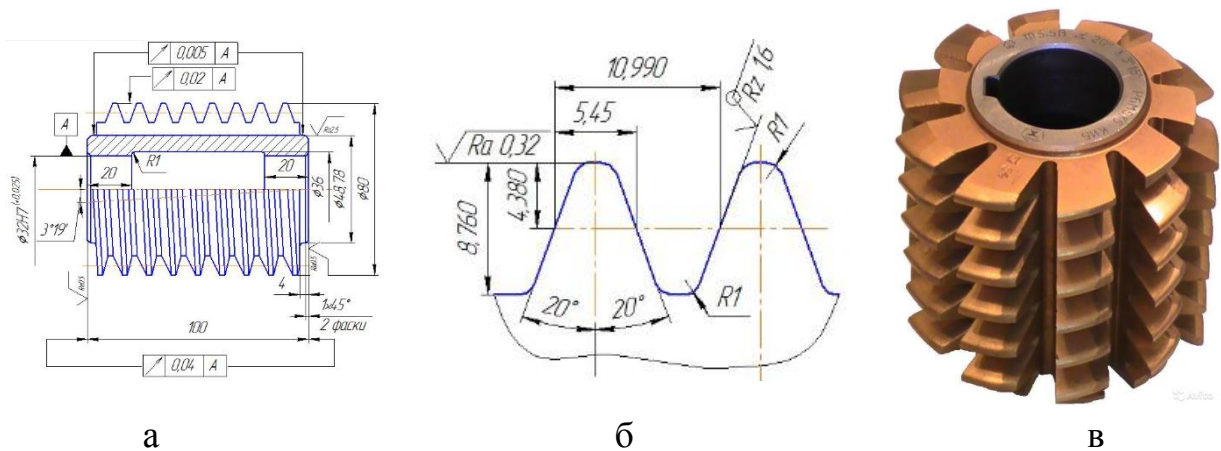
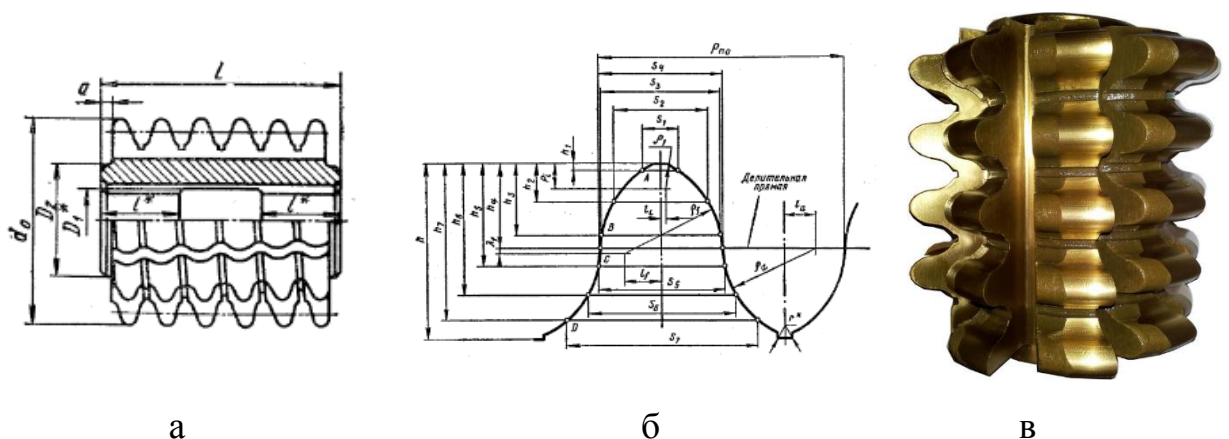


Рис. 1.5. Черв'ячна фреза для нарізування евольвентних зубчастих коліс:

а – кресленик фрези, б – профіль в нормальному перетині, в – фреза



На рис. 1.5. показана черв'ячна фреза для нарізування евольвентних зубчастих коліс та її кресленик, а на рис 1.6 – для нарізування зубчастих коліс із зачепленням Новікова. Як видно з рисунків, профілі фрези відповідають вихідному контуру профіля зуба зубчастої рейки. Він описаний в першому випадку прямими лініями, а в другому – дугами кола, що спрощує технологію профілювання фрез і контроль геометричних параметрів профіля, заданих на кресленику. Ці технологічні міркування вже на стадії проектування закладають теоретичну похибку в забезпечення точності профілю зуба нарізованого колеса.



Рис. 1.7. Проблеми і перспективи забезпечення якості формоутворення зубчастих коліс

У свою чергу, з економічних міркувань, дані фрези використовуються для нарізування зубчастих коліс з однаковим модулем, але різною кількістю зубців. Це додатково вносить свою похибку. Кількість зубців зубчастих коліс залежить від допуску, відповідного ступеня точності зубчастого колеса.

При визначенні інструментальної поверхні для виключення похибок профілю зубців вже на стадії проектування необхідно враховувати геометричні параметри профілю зубців коліс, що виготовляються.

На рис. 1.7 показані проблеми і перспективи забезпечення якості формоутворення зубчастих коліс.

1.2. Сучасний стан теорії формоутворення зубчастих коліс

Будь-який процес «механічного оброблення складається з двох взаємопов'язаних процесів: процесу зрізання припуску і процесу формоутворення» [209].

Загальноприйнятим вважається, що «формоутворення – це утворення необхідної форми деталі, яка визначається геометричним характером і взаємним розташуванням обмежуючих поверхонь, а також розмірами, допусками і шорсткістю» [209].

При цьому «формоутворюючою системою (ФС) верстата будемо називати сукупність механічних елементів системи ВПД, взаємне положення і переміщення яких забезпечує задану траєкторію руху різального інструменту щодо оброблюваної деталі» [229]. «Аналітичну залежність, що зв'язує переміщення ланок ФС з траєкторією руху точок інструменту щодо оброблюваної деталі в системі координат S_0 оброблюваної деталі, будемо називати функцією формоутворення» [229].

При цьому чисто геометрична задача без урахування сил, теплових явищ, зносу інструменту, зводиться до того, що «формоутворення – це отримання заданих кресленням поверхонь деталі» [209].

В основі створення різноманітних методів обробки деталей з точки зору

теорії формоутворення лежить вирішення трьох основних проблем [224]:

«- проектування різальних інструментів для оброблення заданої поверхні деталі при обраній кінематичній схемі формоутворення, яка характеризує рух заготовки щодо інструменту;

- визначення форми поверхні деталі, обробленої заданим інструментом при обраній кінематичній схемі формоутворення;

- визначення кінематичної схеми різання, яка характеризує абсолютні схеми руху заготовки та інструменту в процесі різання, при формоутворенні поверхні деталі відомим різальним інструментом».

В даний час є чисельна література, яка відображає різні аспекти теорії формоутворення поверхонь деталей. Це дозволяє обґрунтовано підходити до вирішення різних практичних завдань – розробляти ефективні способи механічного оброблення деталей, профілювати і розраховувати складні фасонні різальні інструменти, конструювати металорізальні верстати та ін.

Слід зазначити роботи вітчизняних вчених в області теорії формоутворення поверхонь при механічному обробленні деталей, виконані А.І. Грабченком [112], І.Є. Грицаєм [118], [119], [120], С.І. Лашневим [174], В.С. Люкшиним [183], О.В. Мамлюком [184], О.А. Охрименком [192], Б.А. Перепелицею [209], [210], С.П. Радзевичем [225], [226], Н.С. Равською [223], [224], П.Р. Родіним [230], [231], [232], І.І. Семенченком [240], В.О. Шишковим [259], М.І. Юліковим [268], та ін. У зарубіжній літературі слід вказати на монографії F.M.L. Amirouch [271], В.К. Choi [275], К. Marciniak, [283], Chang Chao-Hwa and M.M. Melkanoff [274].

Для розуміння суті поняття формоутворюючих елементів слід звернутися до [174], [210], [230], де зазначено, що «формоутворення здійснюють формоутворюючі елементи (точки, лінії або поверхні), що належать інструменту і взаємодіють з поверхнею деталі при обробленні. При обробленні різанням формоутворюючими є точки або лінії на різальних кромках, а при обробленні тиском формоутворюючими є робочі поверхні інструментів. Формоутворююча поверхня використовується і при різанні, але

лише умовно, як проміжна інструментальна поверхня».

Таким чином, формоутворення включає [209]:

1. Деталь з обмежувачими її поверхнями;
2. Інструмент з формоутворюючими елементами;
3. Формоутворюючі рухи.

Математичною моделлю формоутворення прийнято вважати «сукупність рівнянь і формул, що математично описують ці три складові», а «моделі формоутворення можуть різнитися характером формотворного і контактного елементів (поверхня, лінія, точка); тривалістю контакту (миттєвий або неперервний); формоутворюючим рухом та іншими ознаками» [210].

Завдання моделювання можна поставити по-різному, в залежності від того, що задано і що потрібно знайти, отже, одній і тій же моделі може відповідати кілька різних алгоритмів.

Спочатку системи формоутворення будувалися за вищенаведеним алгоритмом. Для його розвитку і реалізації системного підходу до аналізу, введемо такі позначення:

ФсЕ – формостворювані елементи;

ФуЕ – формоутворюючі елементи;

КСФ – кінематична схема формоутворення;

ВІ – вхідна інформація;

АБ – аналітичний блок.

Тоді пряма задача (рис. 1.8) – при заданій інформації про формостворювані елементи (поверхнях деталі) та про кінематичну схему формоутворення (схема верстата) визначити формоутворюючі елементи (поверхня інструменту).

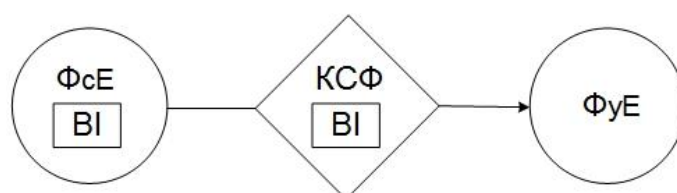


Рис. 1.8. Пряма задача

Зворотна задача (рис. 1.9) – при відомій інформації про формоутворюючі елементи та про кінематичну схему формоутворення визначити формостворювані елементи.

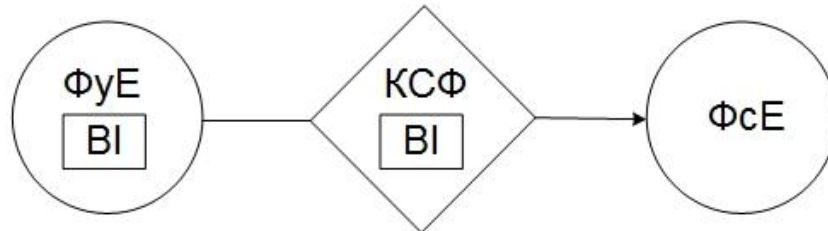


Рис. 1.9. Зворотна задача

З розвитком теорії формоутворення і способів отримання різних поверхонь стали виникати завдання, для яких використовувалася система формоутворення, представлена на рис. 1.10. Це задачі вибору кінематичної схеми формоутворення і параметрів функції формоутворення за відомою інформацією про формоутворюючі та формостворювані елементах, тобто коли задані інструмент і геометрія оброблюваної поверхні, а необхідно визначити способи їх отримання. У системах з механічним зв'язком необхідно розробити обладнання або спеціальні пристрої для виконання необхідних рухів. Ці завдання добре описані і вирішені в роботах [116], [117], [118], [119], [120], [198], присвячених контурному обробленню зубців дисковими фрезами.

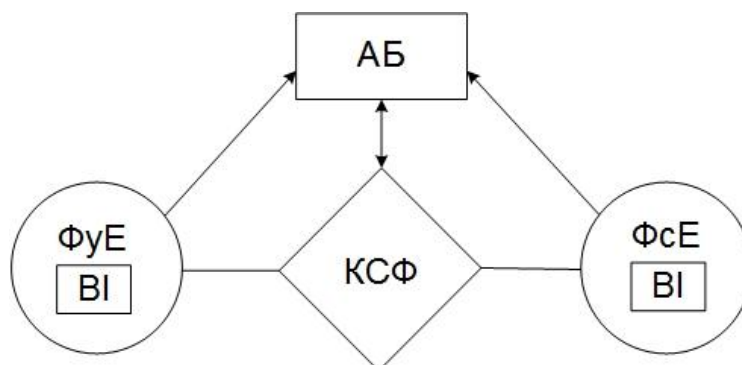


Рис. 1.10. Система формоутворення при відсутності інформація про КСФ

Відомо, що «в системах з електронним зв'язком необхідно вибрати оптимальну стратегію характеру і послідовності багатокоординатних рухів обладнання з ЧПК» [225].

Можливість вибору різних кінематичних схем формоутворення визначило додавання додаткового аналітичного блоку в системі формотворення – АБ (рис. 1.10). Цей блок аналізує доцільність вибору тієї чи іншої КСФ за певними критеріями.

І нарешті, остання система формоутворення, яка розглядається в наукових публікаціях, представлена на рис. 1.11. З рисунку видно, що в наведеній системі відома тільки інформація про формостворюваний елемент (оброблювану поверхню). Формоутворюючі елементи і кінематична схема формоутворення визначаються в результаті аналізу процесу формоутворення.

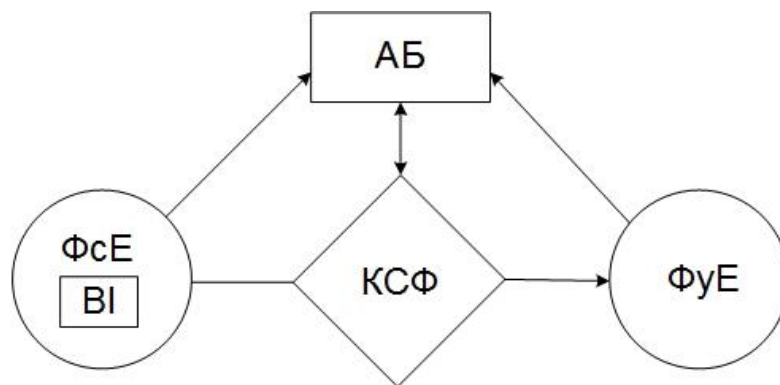


Рис. 1.11. Система формоутворення, коли відома інформація тільки про ФсЕ

Важливо відзначити, що «для того, щоб знайти можливі вихідні інструментальні поверхні та відповідні різальні інструменти, необхідно розглянути різні варіанти рухів поверхні деталі щодо інструменту. «Сукупність рухів поверхні деталі щодо інструменту вважаємо кінематичною схемою формоутворення» (Додаток А) [231].

З точки зору теорії формоутворення важливо, що «найбільш загальною схемою формоутворення буде схема, заснована на поєднанні двох обертань навколо перехресних осей, відносний рух Деталі/Інструменту, при якій може бути представлено як кочення з ковзанням гіперболоїда по гіперболоїду.

Всі наведені в додатку А схеми є окремими випадками цієї схеми,

отриманими при певних часткових положеннях осей обертання і відповідних величинах кутових швидкостей» [231].

Для формоутворення зубчастих коліс методом обкочування найбільший інтерес представляють третій тип кінематичної схеми формоутворення 3-го класу (нарізування зубчастих коліс черв'ячними фрезами), другий тип кінематичної схеми формоутворення 2-го класу (нарізування зубчастих коліс довбачем) і перший тип кінематичної схеми формоутворення 2-го класу (нарізування зубчастих коліс зуборізними гребінками). В останньому випадку вихідна інструментальна поверхня являє собою твірну рейку, в перерізі якої лежить вихідний контур для будь-якого виду зачеплення. Така інструментальна поверхня є спільною для обох коліс циліндричної зубчастої передачі.

Для створення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс необхідно врахувати можливість інтерактивної зміни параметрів кінематичної схеми формоутворення, забезпечивши, тим самим, перехід від одного класу і типу до іншого.

Так, при зміні кута схрещування і відстані між осями кінематичної схеми формоутворення 3-го класу (третій тип) можна отримати різні вихідні інструментальні поверхні, а при рівності нулю кута схрещування – отримати другий тип кінематичної схеми формоутворення 2-го класу. При зведенні одного з діаметрів до нескінченності здійснюється перехід до першого типу кінематичної схеми формоутворення 2-го класу.

Таким чином, виконані раніше глибокі теоретичні дослідження в області теорії формоутворення заклали фундамент, що дозволяє ефективно вирішувати завдання синтезу та аналізу процесу формоутворення зубчастих коліс. У той же час сучасний етап розвитку науки, техніки і технологій вимагає подальшого поглиблення розуміння суті процесу формоутворення, математичних моделей опису як елементів системи формоутворення, так і самої системи в цілому, способів та інструментів автоматизації створення електронних еталонів, згідно яких виготовляються зубчасті колеса і зубооброблювальні інструменти.

1.3. Використання геометричних та кінематичних показників для аналізу якості процесу формоутворення зубчастих коліс

На початку 60-х років було доведено [122], [123], [159], [179], [188], [259], [281], [282], що для дослідження групи зачеплень необхідно використовувати теорію огинаючих двопараметричного сімейства поверхонь.

Незважаючи на те, що два параметри відносного руху не є, насправді, незалежними (вони пов'язані через кінематичні ланцюги верстатів, що застосовуються для нарізування зубчастих коліс), використання цієї теорії дозволяє спростити дослідження зачеплень, а в ряді випадків є єдиним способом, що дає рішення.

В даний час велика частина питань, пов'язаних з формоутворенням зубчастих зачеплень, вирішена завдяки роботам М.М. Крилова [169], [171] і М.Л. Єрихова [140], [141], [142]. В науці і техніці питання синтезу зубчастих зачеплень розглядалися різнобічно і багаторазово. Це роботи І.І. Дусєва [131], А.М. Підкоритова [219], Г.І. Шевелевої [257], В.М. Севрюка [238], А.І. Павлова [194], Д.Т. Бабичева [12], F.L. Litvin [281], [282] та ін., опубліковані останнім часом як в Україні, так і за кордоном.

Можна виділити геометричні та кінематичні складові показників якості, за якими можна здійснювати попередню оцінку процесу формоутворення зубчастих коліс. Ці складові представлені у вигляді геометричних та кінематичних показників таких, як «наведена кривизна робочих поверхонь зубців, швидкість ковзання в зачепленні, сумарна швидкість руху точок контакту робочих поверхонь, кут між вектором швидкості ковзання і контактною лінією, питомі ковзання» [162], [172].

Крім якісних критеріїв існує ряд обмежень, що накладаються на формоутворення зубчастих коліс. Це гранично допустиме мінімальне значення коефіцієнта торцевого перекриття, інтерференція в робочому зачепленні, межі допустимого підрізання, гранично допустиме мінімальне

значення нормальної товщини зуба на поверхні вершин зубців.

Обмеження, що накладаються на формоутворення зубчастих коліс, актуальні не тільки для евольвентних коригованих зубчастих коліс, але й коліс, що мають інше вихідний контур.

Геометричні та кінематичні показники і геометричні обмеження широко використовувалися й використовуються в даний час для аналізу та синтезу процесу формоутворення. Загальні питання синтезу за цими показниками викладені в роботах проф. Гавриленка В.О. [100], проф. Дусєва І.І. [132], [137], проф. Бабичева Д.Т. [9], [10], [11]. Слід також відзначити роботи [175], [222].

При синтезі інструментальних поверхонь виникають питання в правильному виборі кількості і виду критеріїв (інтегральні, усереднені), які відповідають усім точкам активної ділянки вихідного контуру, а також у визначенні вагових коефіцієнтів значущості критеріїв. Це носить суб'єктивний характер, проте значно впливає на результати досліджень.

Так в роботі [60] вказується, що «при збільшенні кількості зубців, які накатуються, та діаметра накатного інструмента відносна швидкість ковзання збільшується, що дозволяє одержувати накатаний зуб з високою якістю обробленої поверхні. Сумарна швидкість руху взаємодіючих поверхонь також впливає на якість оброблюваної поверхні. При її аналізі треба вилучати на виробляючій поверхні ті точки торкання, в яких наявні несприятливі умови накатки, тобто ті точки, в яких сумарна швидкість дорівнює нулю».

Також важливим є те, що «при проектуванні інструмента необхідно перерозподілити питомі ковзання таким чином, щоб вони були мінімальними на зубі накатного інструмента. Аналіз залежностей питомих ковзань від геометрії та кінематики процесу накатки показує, що питомі ковзання на зубі накатного інструмента мають приблизно однакову величину вздовж поверхні зуба, що призводить до його рівномірного зносу», а також те, що «на якість процесу накатки зубців впливає кут між вектором відносної швидкості

ковзання та напрямком контактних ліній. Чим більше цей кут, тим кращі умови накатки» [60].

Автор зазначає: «Величина зусилля накатки залежить від наведеної кривизни контактуючих зубців. Потрібно відзначити, що при збільшенні наведеної кривизни проникнення інструмента в заготовку відбувається при зменшенні зусиль накатки. Перераховані вище геометричні та кінематичні показники процесу накатки зубців за допомогою запропонованого інструмента змінюються в широких межах. При конструюванні інструмента аналіз геометричних та кінематичних показників дозволяє вилучити несприятливі умови накатки, за рахунок чого з'являється можливість вірно обрати геометрію накатного інструмента і різко скоротити кількість дорогих експериментальних досліджень» [60].

В роботі [46] для зубофрезерування гіперболоїдними фрезами: «аналітично одержані умови, що дозволяють обмежити виробляючу поверхню шляхом вилучення на зубцях (витках) інструмента точок з нескінченним питомим сковзанням, що приводить до інтенсивного зносу інструмента.

Одержані умови, що дозволяють визначити точки, на яких сумарна швидкість пресування прагне до нуля, тобто тих точок, в яких самі сприятливі умови різання.

Визначені кути схрещування осей інструмент – заготовка, при яких профільне сковзання спрямоване в один бік, тобто не змінює знаку. Це показує, що профільна подача спрямована в один бік по всьому профілю, і при виготовленні коліс навантаження на зуб гіперболоїдного інструмента можна вирівнювати».

Таким чином, аналіз геометричних та кінематичних показників є обов'язковим завданням теоретичного забезпечення формоутворення, дозволяє ще на етапі дослідження процесу формоутворення зубчастих коліс визначити найбільш сприятливі кінематичні схеми формоутворення і отримати відповідні їм інструментальні поверхні.

1.4. Значення електронних еталонів при формоутворенні зубчастих коліс

Створювана комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формування зубчастих коліс повинна автоматизувати процес генерації функціональних поверхонь зубців та вихідних інструментальних поверхонь зубообробного інструменту, що підвищить точність та прискорить процес створення електронних еталонів цих виробів.

Використання електронних еталонів при формоутворенні зубчастих коліс має великі перспективи. Так електронні еталони є своєрідними копіями, на основі яких, за допомогою САМ-систем, створюються керуючі програми для верстатів з ЧПК і здійснюється комп'ютерна імітація процесу обробки. При використанні адитивних технологій ці комп'ютерні моделі є електронним прототипом для створення зубчастих коліс та інструментів. В САЕ-системах вони є основою для комп'ютерного аналізу різних процесів та властивостей. При використанні сучасних координатно-вимірювальних машин ці еталони є своєрідним шаблоном для порівняльного аналізу з готовими виробами та підготовки висновку щодо відповідності зубчастих коліс та інструментів вимогам точності.

1.4.1. Використання електронних еталонів при формоутворенні зубчастих коліс на верстатах с ЧПК

Використання електронних еталонів для нарізування циліндричних коліс з арочними зубцями с модулем 4, числами зубців 18 та 32 і радіусом розгортки лінії відхилення вихідного контуру на ділильному циліндрі 45 мм на оброблювальному центрі 1П730 пальцевою фрезою викладені в роботі [197] (рис. 1.12).

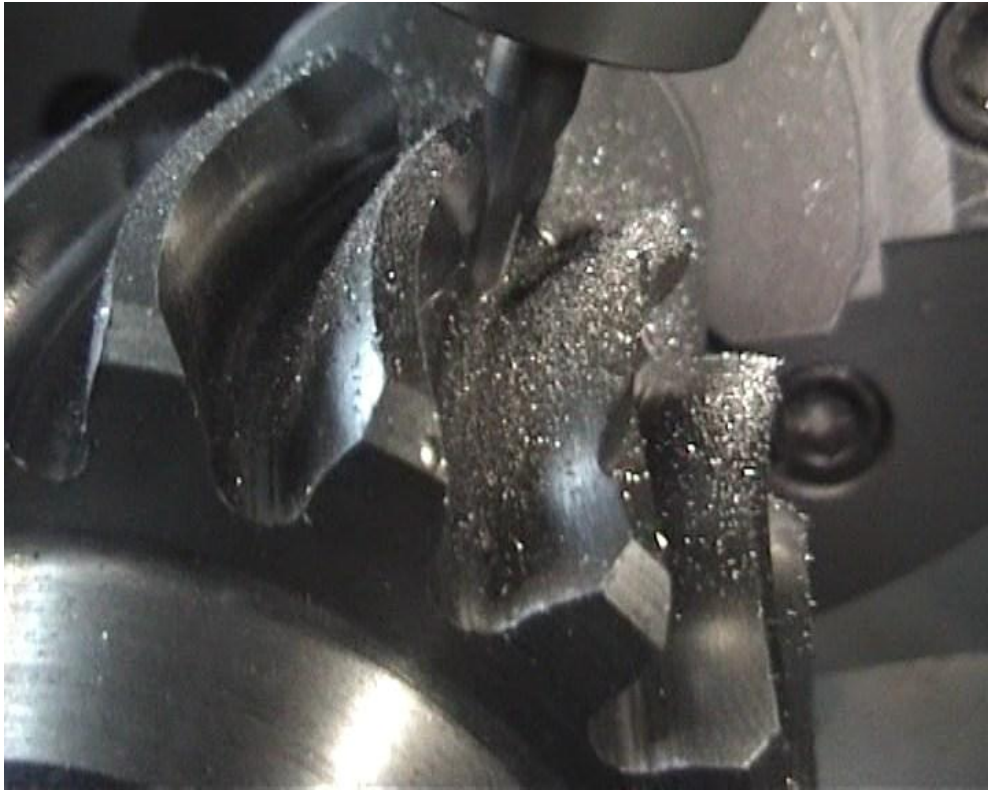


Рис. 1.12. Фото нарізування циліндричних коліс з арочними зубцями з $m=4$ і $z=18$ пальцевою фрезою [197]

В роботі [214] наведено аналіз зачеплення і технологія виготовлення циліндричних коліс з арочними зубцями із застосуванням автоматизованого комплексу TFlex (<http://www.tflex.ru>). У роботі відзначено, що пропоновані методики аналізу, синтезу зачеплення і спосіб виготовлення циліндричних коліс з арочними зубцями дозволяють підвищити універсальність технології виготовлення, зносостійкість і навантажувальну здатність арочного зачеплення.

Виготовлення зубчастих коліс з арочними зубцями із застосуванням пальцевих фрез розглянуто в роботі [215]. Параметри пальцевої фрези і верстатного зачеплення (рис. 1.13) при виготовленні зубчастих коліс з арочними зубцями наведені в роботі [216].

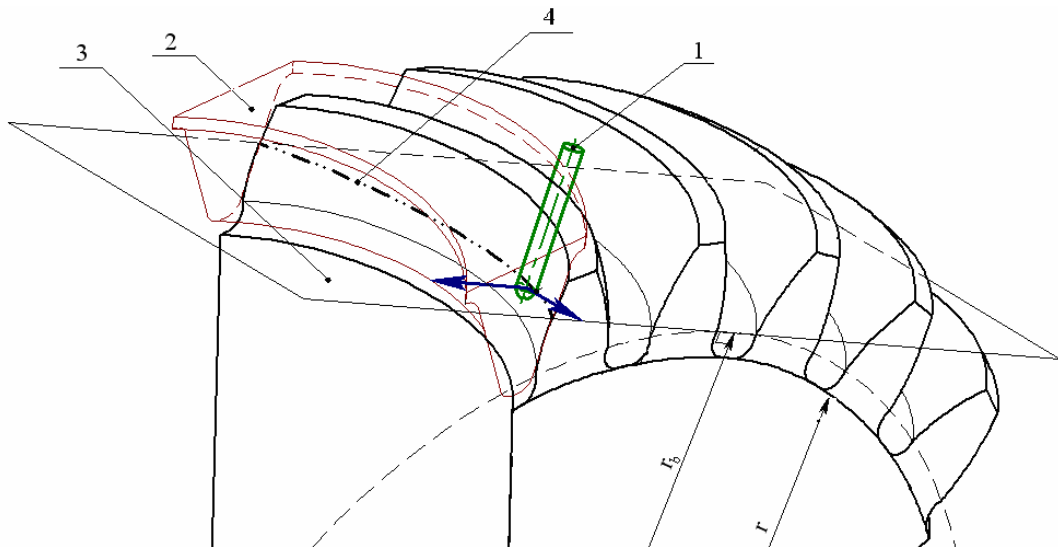


Рис. 1.13. Верстатне зачеплення пальцевої фрези з арочним зубом:
1 - фреза; 2 - умовна інструментальна рейка; 3 - площина верстатного зачеплення; 4 - просторова лінія контакту [216]

Для ефективного застосування електронних еталонів в зубообробці перспективним є високошвидкісне фрезерування - High Speed Cutting (HSC).

«При більш високій швидкості різання рівнодійна сил різання зменшується. Завдяки такій великій швидкості різання можна значно збільшити об'єм різання, тобто досягти великої продуктивності.

Завдяки більш високій швидкості можливе отримання меншого кроку рядів фрезерування, що сприяє поліпшенню якості поверхні деталі (тобто зменшенню залишкової шорсткості і поліпшенню точності форми). Така якість поверхні дуже часто повністю виключає необхідність у додатковій ручній обробці » [98].

«САМ-система створює проходи з дрібним кроком на великих робочих подачах, виключаючи різкі повороти, так як функція попереднього перегляду системи ЧПК автоматично зменшує робочу подачу при наближенні точки зміни напрямку руху. Результатом є геометрично точне фрезерування виробів з досягненням шорсткості поверхні, що виключає фінішне полірування» [258].

Докладний аналіз технології високошвидкісного фрезерування

зроблений в роботі [241]. Так в роботі приведена систематизація швидкості різання різних матеріалів в залежності від виду обробки. Особливу увагу приділено аналізу режимів різання при фрезеруванні загартованих сталей.

В роботі [242] велика увага приділяється практичному дослідженню якості оброблюваних поверхонь: «З даних вимірювання параметрів оброблених деталей випливає, що стратегія обробки і керуюча програма були розроблені правильно, так як відхилення розмірів обробленої деталі від розмірів кресленника не виявлено, а шорсткість обробленої поверхні (8 - 9 клас) відповідає вимогам кресленника».

1.4.2. Адитивні технології

Альтернативою традиційних технологій виробництва зубчастих коліс методами механічного оброблення є адитивні технології. «Адитивні технології або Additive Manufacturing (АМ-технології) – загальний термін для назви технологій виготовлення виробів по цифровій моделі – електронному еталону (або САD моделі) методом пошарового додавання матеріалу» [270], [277]. «В стандарті ASTM F2792.1549323-1 адитивні технології визначені як «process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies» («процес об'єднання матеріалу з метою створення об'єкта з даних 3D-моделі, як правило, шар за шаром, на відміну від виробничих технологій, в яких матеріал «віднімається») [151].

Колектив авторів під керівництвом проф. Грабченка А.І в своєму навчальному посібнику [111] визначає адитивні технології як високі технології: «Високими слід вважати такі технології, які, володіючи сукупністю основних ознак - наукоємність, системність, фізичне і математичне моделювання з метою структурно-параметричної оптимізації, високоефективний робочий процес розмірної обробки, комп'ютерне технологічне середовище і автоматизація всіх етапів розробки і реалізації, стійкість і надійність, екологічна чистота, - при відповідному технічному

і кадровому забезпеченні (прецизійне обладнання, оснащення та інструмент, певний характер робочого технологічного середовища, система діагностики, комп'ютерна мережа керування і спеціалізована підготовка персоналу), гарантують отримання виробів, що володіють новим рівнем функціональних, естетичних і екологічних властивостей.

Концепція трьох рівнів дозволяє системно розглядати і реалізовувати весь потенціал найрізноманітніших технологій, які відповідають адитивному принципом «знизу-вгору».

На макрорівні проводиться пошарове вирощування твердих тіл, перехід від віртуального простору і віртуальних моделей до твердотільних об'єктів незалежно від ступеня складності їх конструкції, форм і розмірів. Це технології Rapid Prototyping, наплавлення, електродугове, електрошлакове, плазмове, газотермічне покриття і т. д.

На мікрорівні проводиться нарощування мікрошарів з різних матеріалів в будь-якій послідовності товщиною від нанометрів до десятків мікрометрів. Це технології вакуумно-плазмові, хімічні, хіміко-термічні і т. і.

На нанорівні здійснюється атомно-молекулярна самоорганізація і пошарове нарощування об'єму, коли товщина шарів складає від частки нанометра до декількох нанометрів, а граничний шар за рахунок текстурування і ін. прийомів формує фізичну поверхню, її топографію і функціональні властивості з урахуванням анізотропії. Такі процеси відносяться до галузі нанотехнологій» [111].

«Виготовлені генеративних способом прототипи створюються на базі 3D CAD даних, і їх виготовлення здійснюється автоматично без інструменту і оснастки, а лише на підставі електронного еталона виробу.

Нижче наведені адитивні технології, що застосовуються як для виготовлення виробів з композитних матеріалів, що містять метали, так і чистих металів і сплавів.

1 Струменевий тривимірний друк (3DP)

2 Друк методом ламінування (LOM)

- 3 Пошарове наплавлення (FDM / FFF)
- 4 Вибіркове лазерне спікання (SLS) і пряме спікання металів (DMLS)
- 5 Вибіркова лазерна (SLM) і електронно-променева плавка (EBM)
- 6 Пряма лазерна адитивна побудова (CLAD)
- 7 Довільна електронно-променева плавка (EBF₃)» [111].

В роботі [167] розглянуто виготовлення функціональних дослідних зразків алмазних зубчастих хонів на установці Vanguard Si2 SLS і нанесення на зубчастий вінець суміші, яка містить алмази і складається з фотореактивної смоли, алмазного порошку і наповнювача і подальшого їх спікання в камері ультрафіолетового затвердіння RCA-500 (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Фото алмазного зубчастого хона [167]

1.4.3. Використання електронних еталонів при контролі точності готових зубчастих коліс

В даний час широкого поширення набувають координатно-вимірвальні машини (КВМ) різних типів. Як зазначається в роботі [288]: «Принципова основа координатного методу вимірювання полягає в тому, що будь-яку поверхню або профіль можна уявити, що вони складаються з нескінченного числа окремих точок і якщо відомо положення в просторі якогось обмеженого числа цих точок (масив точок) , тобто визначено їх

координати, то за відповідними формулами (алгоритмами) можна розрахувати розміри цих поверхонь (профілів) і відхилення форми, а також визначити розташування поверхонь (профілів) в просторі і між собою (координатні розміри і відхилення розташування)».

«Методика координатних вимірювань (МКВ) включає в себе стратегію вимірювання (число точок, їх розташування на контрольованих поверхнях і порядок пересування між ними) і розрахункову модель, яка математично описує взаємозв'язок координат вимірюваних точок з обумовленими лінійно-кутовими параметрами. МКВ - це основа ефективного програмного забезпечення (ПЗ) для координатно-вимірювальної техніки » [244].

Перш за все координатно-вимірювальні машини по області застосування можна розділити на спеціалізовані та універсальні. Так, для вимірювання та контролю геометрії зубчастих коліс розроблені спеціалізовані КВМ, відмінною рисою яких є обов'язкова наявність високоточного поворотного столу.

Найбільш відомі спеціалізовані зубовимірювальні КВМ фірм Gleason (США) (<http://www.gleason.com/products/343/analytical-gear-inspection>), Osaka Seimitsu Kikai Co., Ltd. (Японія) (http://www.osk-corp.co.jp/Catalog/Measuring_Instruments_JE-1602.pdf), Klingelnberg (Німеччина) (<http://www.klingelnberg.com/produkte/praezisionsmesszentren.html>), Penta Gear Metrology (США) (<http://pentagear.com>), Mahr GmbH (Германія) (<http://pentagear.com>), Wenzel America, Ltd. (США) (<http://wenzelamerica.com/cmm/applications/gear-inspection>), та ін.

«Для реалізації методики координатних вимірювань (МКВ) зубчастих коліс на універсальних КВМ, розробники ПЗ розширюють можливості базових програм за рахунок спеціальних додатків і програмних модулів. Наприклад, фірма Wilcox доповнює базову конфігурацію PC-DMIS спеціальним додатком для координатних вимірювань зубчастих коліс PC-DMIS Gear. » [245]. Фірма Wenzel America, Ltd. (США) випускає ПО Wenzel TGear inspection machine software (<http://wenzelamerica.com/products/software/>

gear)]. Слід також зазначити фірми, що випускають сучасне ПЗ для аналізу і конструювання зубчастих зачеплень: Frencо GmbH (Німеччина) (www.frenco.de), Involute Simulation Softwares Inc. (Канада) (www.hygears.com), KISSsoft LLC (США) (www.kisssoft.com), Stresstech Oy (Фінляндія) (www.stresstechgroup.com).

«Сучасні універсальні координатно-вимірювальні машини можна класифікувати за різними критеріями. Так по взаємодії з вимірюваною поверхнею КІМ можна розділити на контактні, безконтактні і комбіновані (мультисенсорні) системи, по керуванню процесом вимірювань на:

- машини з ручним керуванням;
- машини з автоматичним переміщенням по осях і джойстиками ручного керування,
- машини з автоматичним переміщенням по осях і числовим програмним керуванням (CNC). Крім того, існують різні комбіновані схеми, які застосовуються для машин, які об'єднують всі вищевказані принципи.

Контактні КВМ можна класифікувати як стаціонарні і портативні (мобільні). В свою чергу стаціонарні координатно-вимірювальні машини за схемою компонування і орієнтації вимірювального інструмента поділяються на горизонтальні, вертикальні, мостові і порталні.

Слід, також, відзначити шестивісні КВМ на основі платформи Стюарта. Представниками таких машин є координатно-вимірювальні машини, що випускаються ТОВ «Лапик» (Росія). Переміщення платформи здійснюється шістьма лінійними приводами, кожен з яких має лазерні інтерферометри» [161].

В даний час сучасні стаціонарні КВМ забезпечують точність вимірювань рівну десятим частинам мікрона. «Висока точність вимірювання на КВМ забезпечується:

- прецизійними напрямними, виконаними з твердокам'яних порід, наприклад, з граніту (стійка, балка portalу, повзун);
- конструкцією portalу, виконаного у вигляді жорсткої замкнутої

рами;

- предметним столом, що виключає деформації опори і напрямних порталів, що виникають під дією маси вимірюваних важких деталей;
- жорсткими, вібростійкими, прецизійними аеростатичними опорами з малим повітряним зазором і мінімальною витратою повітря;
- віброізолюючими опорами, які автоматично підтримують горизонтальне положення опори КВМ;
- прецизійними фотоелектричними системами вимірювання переміщень вузлів КВМ по всіх координатах » [206].

На заключній контрольній операції вибір координатно-вимірювальної машини залежить від величини допуску на геометричні розміри зубчастих коліс. КВМ повинна повністю забезпечувати задану точність.

Висновки, мета і задачі

1. Аналіз сучасного стану теорії формоутворення показав, що з появою комп'ютерних технологій теорія формоутворення істотно змінилася, розвиток теорії поверхонь і параметричного комп'ютерного моделювання дали можливість змінити підхід до розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс.

2. З'явилися нові методики комп'ютерного поверхневого моделювання, що дозволяють видозмінювати форму поверхні в процесі конструювання, причому намітилося два підходи до способів керування формою: перетворення простору разом з розташованими в ньому об'єктами і видозміни формостворюваних об'єктів за допомогою внутрішніх керуючих параметрів.

3. Розвиток теорії сплайнів та її комп'ютерної реалізації дозволяє уніфікувати математичний опис об'єктів і розробляти універсальні системи формоутворення функціональних поверхонь.

3. Існуюча класифікація кінематичних схем формоутворення вимагає

подальшого аналізу. Створення універсального математичного опису функції формоутворення дозволить автоматизувати вибір найбільш ефективної схеми на підставі аналізу процесу формоутворення.

5. Сучасний стан аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодіючих поверхонь дозволяє представити геометричні та кінематичні показники як функцію від керуючих параметрів формоутворюваних поверхонь. Це дає можливість включати ці показники в систему формоутворення і в інтерактивному режимі оцінити ефективність процесу формоутворення.

Грунтуючись на вищесказаному, метою цієї роботи є забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва на базі нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс в частині розвитку підходів до математичного опису функціональних поверхонь зубців та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх формоутворення, інтеграції з сучасними комп'ютерними технологіями проектування та виробництва.

2. Розробити комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс на основі уніфікації керуючих параметрів її елементів.

3. Розробити математичне забезпечення опису форми зубців зубчастих коліс, вихідних інструментальних поверхонь, геометричних і кінематичних показників процесу формоутворення на базі уніфікованих керуючих параметрів.

4. Реалізувати можливість інтерактивного керування кривими і поверхнями, що утворюють функціональні поверхні зубчастих коліс,

забезпечити параметризацію елементів системи формоутворення зубчастих коліс, геометричних і кінематичних показників на базі єдиних уніфікованих керуючих параметрів, інтеграцію з автоматизованими системами проектування, виготовлення, аналізу та контролю.

5. Розробити нові підходи до узагальненого опису параметрів функції формоутворення, уніфікувати її математичне подання та проаналізувати можливості часткових випадків кінематичної схеми формоутворення 3-го класу для удосконалення інструменту..

6. Розробити математичне забезпечення для опису геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, як функції від уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення, що дозволяє візуалізувати результати аналізу процесу формоутворення зубчастих коліс.

7. Розробити нові методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення, які в сукупності реалізують комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, впровадити їх у виробництво та у навчальний процес.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРУВАННЯ ФОРМОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НА ОСНОВІ УНІФІКОВАНИХ КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ

Для створення комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс в першу чергу необхідно розробити методи формування математичної моделі інтерактивного керування кривими і поверхнями, які б враховували можливість наскрізної параметризації елементів систем формоутворення, геометричних і кінематичних показників і сприяли б інтеграції з автоматизованими системами проектування, виготовлення, аналізу і контролю.

Щоб уніфікувати керуючі параметри, що впливають на геометрію будь-яких поверхонь, потрібно розробити математичне і методичне забезпечення процесу уніфікації керуючих параметрів, які дозволить перетворити математичний опис будь-якої кривої або поверхні до єдиного вигляду.

Для аналізу геометрії синтезованих функціональних поверхонь зубчастих коліс і розробки елементів візуального інтерактивного аналізу геометрії та кінематики процесу взаємодії робочих поверхонь зубців і інструментальних поверхонь необхідно отримати залежності, що описують внутрішню геометрію функціональних поверхонь, як функції уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення.

2.1. Методи керування формою кривих за допомогою керуючих елементів

Геометричною формою різних ліній, що описують координатні лінії функціональних поверхонь можна керувати за допомогою характерних точок, які однозначно визначають форму лінії.

Керуючими точками будемо називати такі геометричні об'єкти,

положенням яких в деякому просторі можна керувати як безпосередньо за допомогою курсору комп'ютерного маніпулятора, так і задаючи різними способами координати цих точок в певній системі координат. Від положення керуючих точок залежить стан і властивості інших геометричних об'єктів.

Координати керуючих точок будемо розглядати в даній роботі як керуючі параметри завдань синтезу та аналізу.

Керуючими лініями будемо називати геометричні об'єкти, які однозначно визначають форму керуючих поверхонь і залежать від розташування керуючих точок.

В якості керуючих ліній можна використовувати будь-які з розглянутих вище ліній. Розглянемо керування формою лінії на прикладі широко застосовуваних для опису профілю і поздовжньої напрямної лінії зуба дуг кіл [128].

Профіль складається з двох ділянок кривих, доплюсної та заплюсної, які мають загальну дотичну в полюсі зачеплення (рис. 2.1).

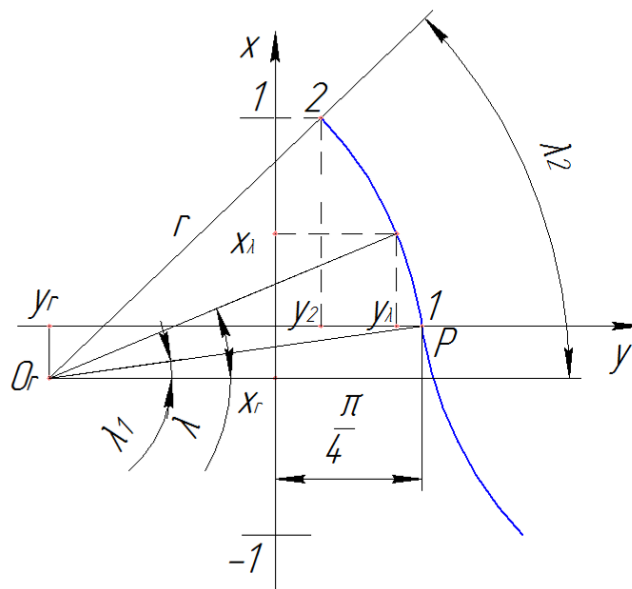


Рис. 2.1. Профіль в нормальному перетині

Прийmemo все лінійні розміри профілю кратними модулю зачеплення m . Тоді, координата x доплюсної ділянки буде змінюватися від -1 до 0 , а

заполюсної від 0 до 1 .

Розглянемо заполюсну ділянку. За криву виберемо дугу кола радіусом r . Координати центру кола і радіус можна задавати довільним чином з обмеженнями певними технічними міркуваннями.

$$r = \sqrt{x_r^2 + \left(\frac{\pi}{4} - y_r\right)^2} \quad (2.1)$$

Визначимо координати опорних точок. Точка 1 збігається з полюсом зачеплення P і має координати $x_1=0$; $y_1=\pi$.

$$\text{Кут } \lambda_1 = \arcsin\left(-\frac{x_r}{r}\right).$$

Координати точки 2:

$$x_2=1; \quad y_2=r\cos\lambda_2 + y_r, \quad (2.2)$$

$$\text{де } \lambda_2 = \arcsin\left(\frac{1-x_r}{r}\right)$$

Координати дуги кола в декартовій системі координат XOY дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} x(\lambda) &= r\sin\lambda + x_r \\ y(\lambda) &= r\cos\lambda + y_r \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для вихідного контура кут α співпадає з кутом λ .

На підставі отриманих залежностей розроблено програмне забезпечення «СОРТеR» [234]. На рис. 2.2 і рис. 2.3 показано, як змінюючи положення центру кола при фіксованій точці 1 , можна змінювати форму дуги в інтерактивному режимі за допомогою комп'ютерного маніпулятора.

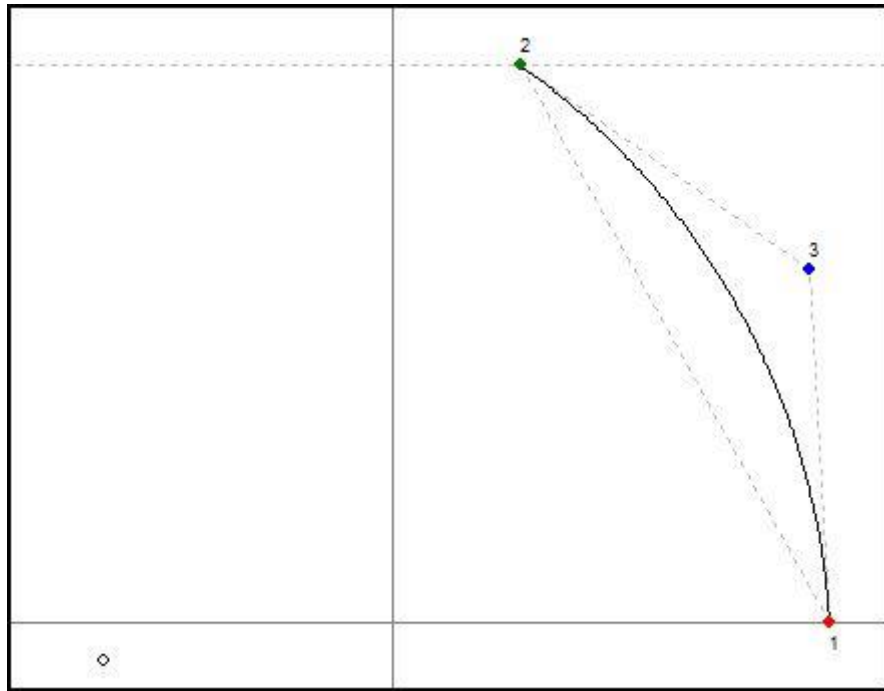


Рис. 2.2. Початкове положення центру кола

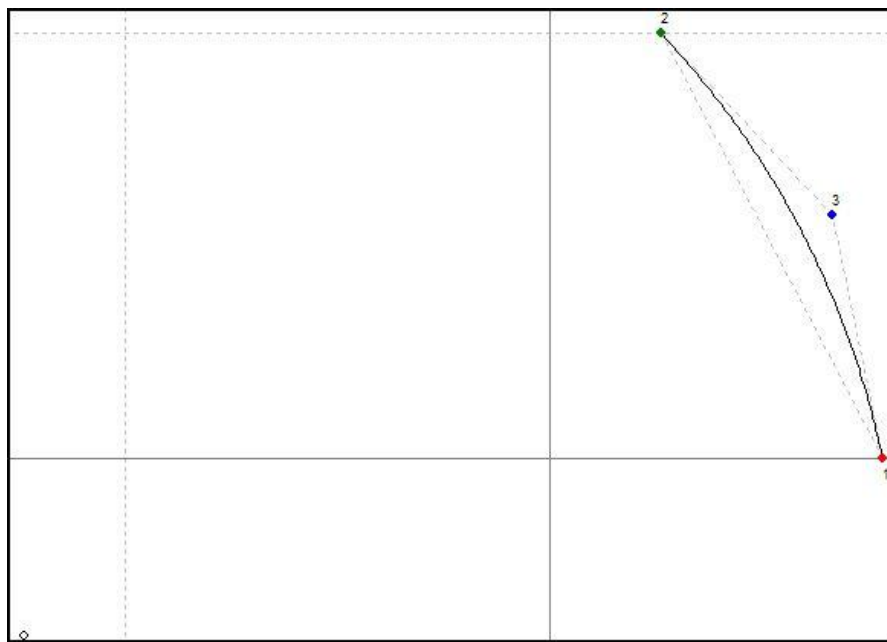


Рис. 2.3. Зміна форми дуги за рахунок переміщення центру кола

Розглянемо випадок, коли твірна поверхня рейкового типу має кругову лінію зуба (рис. 2.4). Для зміни поздовжньої лінії зуба твірної поверхні введемо три керуючих елементи N_0 , N_1 , N_2 [86].

N_0 – базисна точка, пов'язана з початком системи координат S_n . Через цю точку проходить крива, яка визначає подовжню лінію зуба. Точка N_0

(початок систем координат S_n) лежить в середній торцевій площині твірної поверхні.

Точка N_1 лежить на дотичній до кривої, що розглядається, в точці N_0 та дозволяє керувати кутом нахилу β_0 цієї дотичної. Точка N_2 лежить на кривій, що розглядається та керує радіусом її кривизни R_u .

Для спрощення керування приймемо координати $z_1 = -\frac{b}{2}$, а $z_2 = \frac{b}{2}$, де b – ширина твірної поверхні.

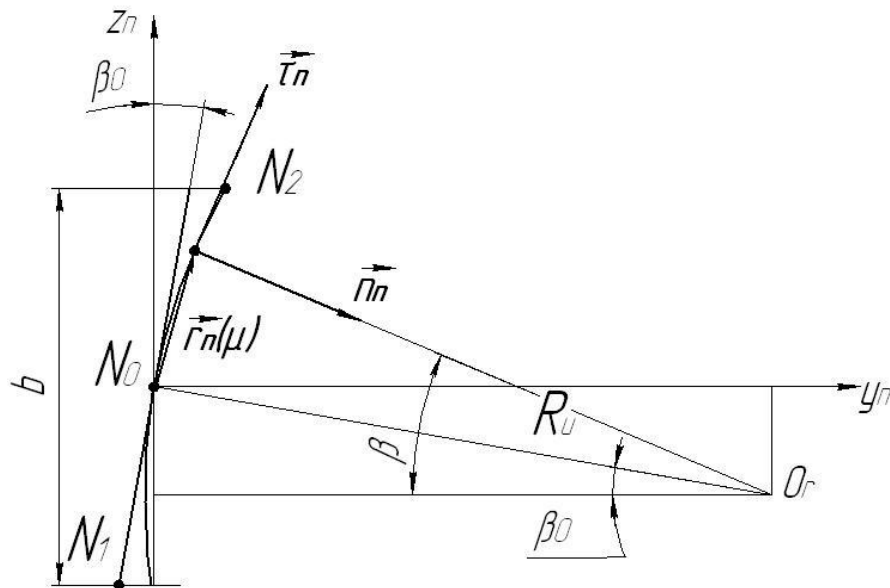


Рис. 2.4. Поздовжня лінія зуба твірної поверхні

У цьому випадку рівняння кривої, що визначає лінію зуба твірної поверхні в системі координат S_n , має вид:

$$\bar{r}_n(\mu) = R_u(\cos \beta_0 - \cos \beta) \bar{j} + R_u(\sin \beta - \sin \beta_0) \bar{k}. \quad (2.4)$$

Або в координатній формі:

$$\begin{aligned} x_n(\mu) &= 0; \\ y_n(\mu) &= R_u(\cos \beta_0 - \cos \beta); \\ z_n(\mu) &= R_u(\sin \beta - \sin \beta_0), \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.2. Видозміна геометрії кривих і поверхонь шляхом перетворення простору

Термін «політканина» введений у вжиток відомим німецьким геометром, керівником Гамбурзької математичної школи і послідовником Ф. Клейна В. Бляшке [17] наприкінці 20-х років XX століття.

Теорія політканинних перетворень дозволяє керувати за допомогою керуючих точок політканинної системи координат формою будь-якої кривої або поверхні, обраних в якості прообразу. При цьому вигляд кривої або поверхні змінюються.

Розглянемо це на прикладі кривої, вписаною в політканинну систему координат. При цьому дві осі системи є дотичними в початковій і кінцевій точках кривої.

В якості кривої виберемо дугу кола (рис. 2.6), наведену в попередньому параграфі [126], [128].

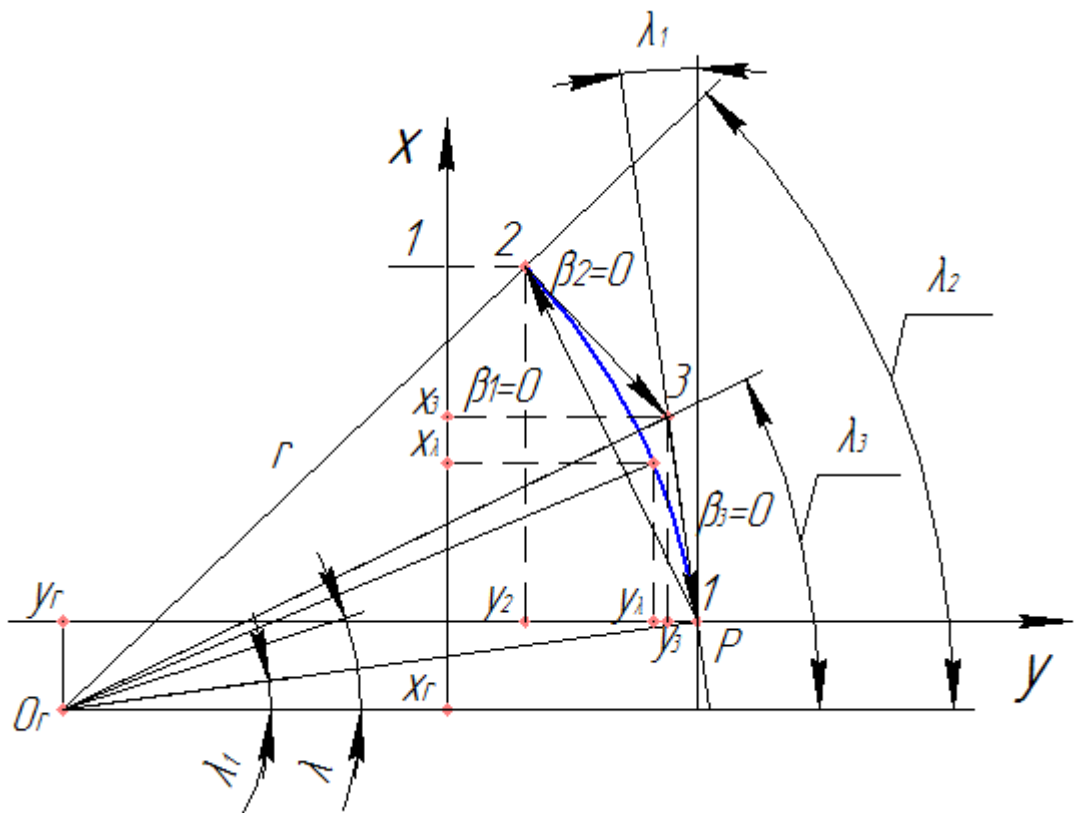


Рис. 2.6. Дуга кола в політканинній системі координат

Координати точок 1 і 2 отримані в попередньому підрозділі. Одержимо координати точки 3 і кути, пов'язані з цією точкою [87].

Відрізок $Or3$ є бісектрисою кута $2Or1$, тому кут:

$$\lambda_{13} = \frac{\lambda_{12}}{2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}. \quad (2.6)$$

З прямокутного трикутника $Or13$ знаходимо катет:

$$|13| = r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right). \quad (2.7)$$

З огляду на отримані залежності координати точки 3 дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} x_3 &= |13| \cos \lambda_1 = r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) \cos \lambda_1 \\ y_3 &= 1 - |13| \sin \lambda_1 = 1 - r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) \sin \lambda_1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Кут

$$\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_{13} = \lambda_1 + \frac{\lambda_2}{2} - \frac{\lambda_1}{2} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}. \quad (2.9)$$

Прямолінійні політканини визначимо з виразів (3.6) і (3.10) роботи [127]:

$$\beta_1(\lambda) = a_1(r \sin \lambda + x_r) + b_1(r \cos \lambda + y_r) + c_1 = a_1 r \sin \lambda + b_1 r \cos \lambda + (a_1 x_r + b_1 y_r + c_1); \quad (2.10)$$

де

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{r \cos \lambda_2 + y_r - \frac{\pi}{4}}{|12|}; \quad b_1 = \frac{-1}{|12|}; \quad c_1 = \frac{\frac{\pi}{4}}{|12|}; \\ |12| &= \sqrt{1 + \left(r \cos \lambda_2 + y_r - \frac{\pi}{4}\right)^2} \end{aligned}$$

Аналогічно визначимо β_2 та β_3

$$\beta_2(\lambda) = a_2(r \sin \lambda + x_r) + b_2(r \cos \lambda + y_r) + c_2 = a_2 r \sin \lambda + b_2 r \cos \lambda + (a_2 x_r + b_2 y_r + c_2); \quad (2.11)$$

де

$$a_2 = \frac{\left(1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right) - (r \cos \lambda_2 + y_r)}{|23|}; \quad .$$

$$b_2 = \frac{1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1}{|23|};$$

$$c_1 = \frac{\left(r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1 - 1\right) \cdot (r \cdot \cos \lambda_2 + y_r)}{|23|} -$$

$$\frac{\left(1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right) - (r \cdot \cos \lambda_2 + y_r)}{|23|};$$

$$|23| = \sqrt{\left(r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1 - 1\right)^2 + \left(\left(1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right) - (r \cdot \cos \lambda_2 + y_r)\right)^2}$$

$$\beta_3(\lambda) = a_3(r \sin \lambda + x_r) + b_3(r \cos \lambda + y_r) + c_3 = a_3 r \sin \lambda + b_3 r \cos \lambda + (a_3 x_r + b_3 y_r + c_3); \quad (2.12)$$

де

$$a_3 = \frac{\frac{\pi}{4} - \left(1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right)}{|31|}; \quad .$$

$$b_3 = \frac{r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1}{|31|};$$

$$c_1 = \frac{\left(-r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1\right) \cdot \left(1 - r \cdot \sin \lambda_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}{|31|} -$$

$$\frac{\frac{\pi}{4} - \left(1 - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right) \left(r \cdot \cos \lambda_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}{|31|};$$

$$|31| = \sqrt{\left(-r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \cos \lambda_1\right)^2 + \left(\frac{\pi}{4} - 1 + r \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \cdot \sin \lambda_1\right)^2}$$

Використовуючи формули (5.2) і (3.20) роботи [127], отримаємо координати вихідного контуру:

$$x_k = f_1(\lambda) = \frac{D_y(\lambda)G(\lambda) - D(\lambda)G_y(\lambda)}{D_x(\lambda)G_y(\lambda) - D_y(\lambda)G_x(\lambda)}$$

$$y_k = f_2(\lambda) = \frac{D(\lambda)G_x(\lambda) - D_x(\lambda)G(\lambda)}{D_x(\lambda)G_y(\lambda) - D_y(\lambda)G_x(\lambda)} \quad (2.13)$$

де

$$D_x(\lambda) = K_{x31}[\beta_1(\lambda) \cdot A_3 - \beta_3(\lambda) \cdot A_1] + K_{x32}[\beta_2(\lambda) \cdot A_3 - \beta_3(\lambda) \cdot A_2];$$

$$G_x(\lambda) = K_{y31}[\beta_1(\lambda) \cdot A_3 - \beta_3(\lambda) \cdot A_1] + K_{y32}[\beta_2(\lambda) \cdot A_3 - \beta_3(\lambda) \cdot A_2];$$

$$D_y(\lambda) = K_{x31}[\beta_1(\lambda) \cdot B_3 - \beta_3(\lambda) \cdot B_1] + K_{x32}[\beta_2(\lambda) \cdot B_3 - \beta_3(\lambda) \cdot B_2];$$

$$G_y(\lambda) = K_{y31}[\beta_1(\lambda) \cdot B_3 - \beta_3(\lambda) \cdot B_1] + K_{y32}[\beta_2(\lambda) \cdot B_3 - \beta_3(\lambda) \cdot B_2];$$

$$D(\lambda) = K_{x31}[\beta_1(\lambda) \cdot C_3 - \beta_3(\lambda) \cdot C_1] + K_{x32}[\beta_2(\lambda) \cdot C_3 - \beta_3(\lambda) \cdot C_2];$$

$$G(\lambda) = K_{y31}[\beta_1(\lambda) \cdot C_3 - \beta_3(\lambda) \cdot C_1] + K_{y32}[\beta_2(\lambda) \cdot C_3 - \beta_3(\lambda) \cdot C_2];$$

$$\begin{aligned}
K_{x31} &= \frac{A_3}{\beta_3(\lambda)\beta_2(\lambda)} - \frac{A_1}{\beta_1^2(\lambda)}; \\
K_{x32} &= \frac{A_3}{\beta_3(\lambda)\beta_2(\lambda)} - \frac{A_2}{\beta_2^2(\lambda)}; \\
K_{y31} &= \frac{B_3}{\beta_3(\lambda)\beta_1(\lambda)} - \frac{B_1}{\beta_1^2(\lambda)}; \\
K_{y32} &= \frac{B_3}{\beta_3(\lambda)\beta_2(\lambda)} - \frac{B_2}{\beta_2^2(\lambda)}.
\end{aligned}$$

Як видно з наведених виразів, форма кривої залежить від коефіцієнтів A_i, B_i, C_i . Ці коефіцієнти однозначно залежать від координат керуючих точок (3.10) роботи [127]:

$$\begin{aligned}
A_i &= \frac{y_j - y_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}; \\
B_i &= \frac{x_j - x_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}; \\
C_i &= -(B_i y_i + A_i x_i).
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Для політканинних перетворень було розроблено програмне забезпечення «СОРТеR» [234]. На рис. 2.7 показаний результат інтерактивного політканинного перетворення кривої.

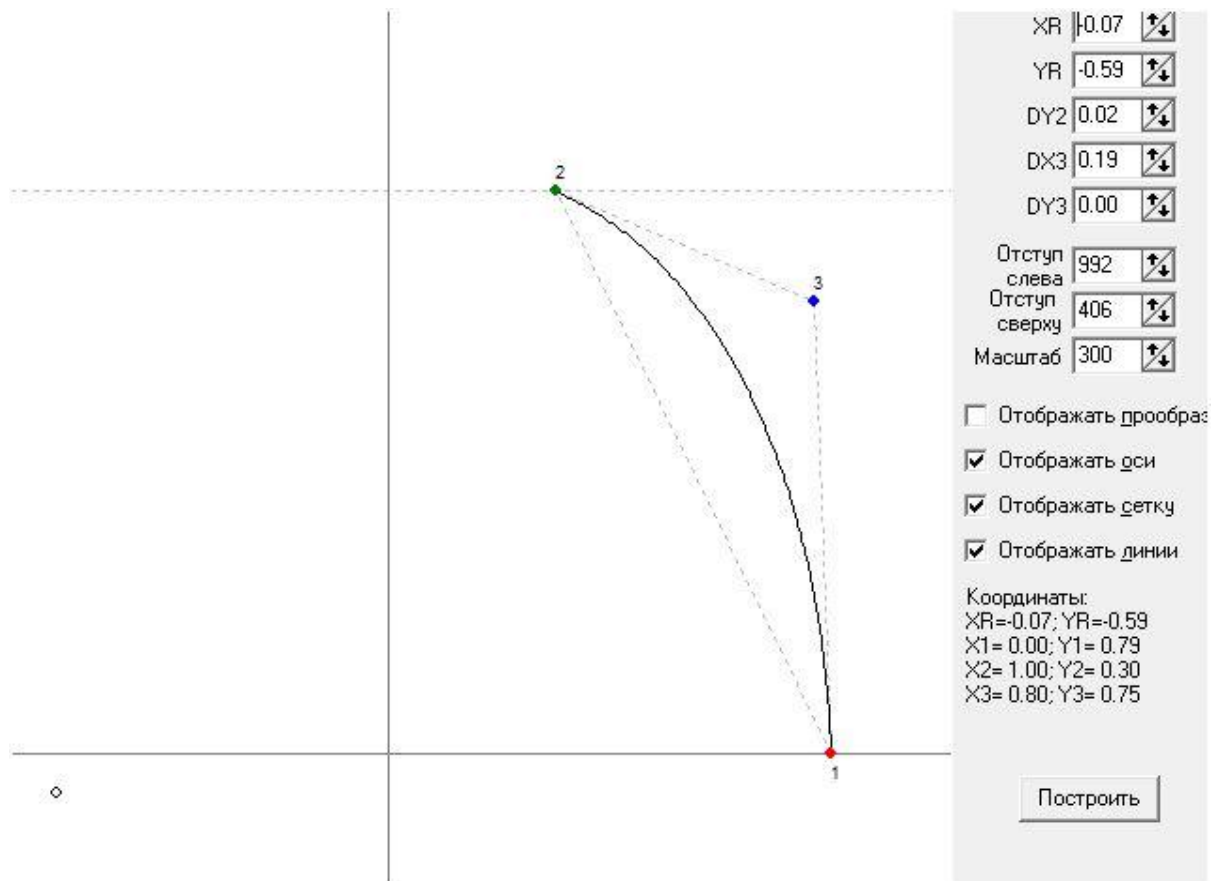


Рис. 2.7. Інтерактивне політканинне керування кривою

2.3. Видозміна геометрії кривих і поверхонь шляхом зміни внутрішніх параметрів

Використання політканинних перетворень відкриває нові можливості в керуванні геометрією складних поверхонь. При цьому за вихідну поверхню або криву можна вибрати будь-який клас аналітично описаних кривих або поверхонь. Недоліком синтезу на базі політканинних перетворень є те, що він застосовується для аналітично описаних кривих і для кожного нового класу необхідно коригувати математичний опис прообразу. Це обмежує можливість уніфікації математичного апарату інтерактивного синтезу.

Звести наявні математичні описи кривих, використовуваних в існуючих описах координатних ліній поверхонь, до єдиного вигляду можна за рахунок використання сплайнів. Більш детально це буде розглянуто в наступному параграфі. Особливе місце в задачах керування формою ліній

займають криві Безьє третього порядку. Крім того, вони знайшли застосування в більшості існуючих систем твердотільного і поверхневого комп'ютерного моделювання.

На рис. 2.8 показаний профіль твірної поверхні. Як кривої, що дозволяє модифікувати профіль в процесі інтерактивного синтезу, приведена крива Безьє 3-го порядку [27].

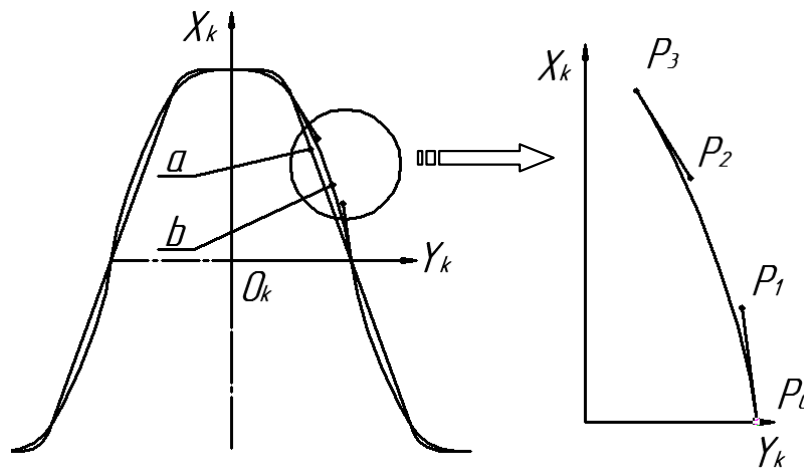


Рис. 2.8. Профіль твірної поверхні:

а – стандартний, б – модифікований

На рис. 2.9 наведена крива Безьє 3-го порядку з опорними та керуючими точками та лініями [107].

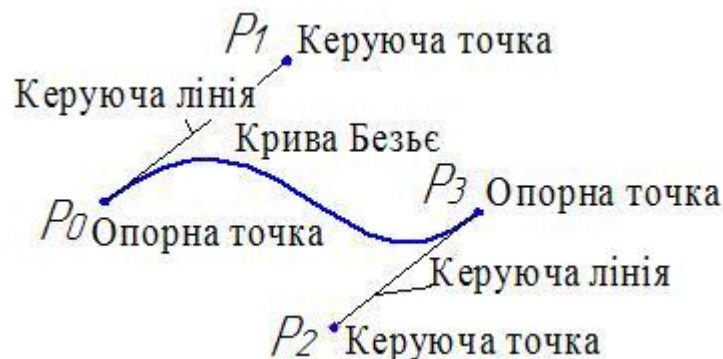


Рис. 2.9. Крива Безьє 3-го порядку з опорними і керуючими точками і лініями

Рівняння кривої Безьє 3-го порядку [107]:

$$\bar{r}_k = (1-\lambda)^3 p_0 + 3(1-\lambda)^2 \lambda p_1 + 3(1-\lambda) \lambda^2 p_2 + \lambda^3 p_3, \quad (2.15)$$

або у параметричному виді:

$$\begin{aligned} x_k &= f_1(\lambda, P_x) = (1-\lambda)^3 x_0 + 3(1-\lambda)^2 \lambda x_1 + 3(1-\lambda) \lambda^2 x_2 + \lambda^3 x_3, \\ y_k &= f_2(\lambda, P_y) = (1-\lambda)^3 y_0 + 3(1-\lambda)^2 \lambda y_1 + 3(1-\lambda) \lambda^2 y_2 + \lambda^3 y_3. \end{aligned} \quad (2.16)$$

де $P_x=(x_0, x_1, x_2, x_3)$, $P_y=(y_0, y_1, y_2, y_3)$ – радіус-вектори координат опорних P_0 , P_3 та керуючих P_1 , P_2 точок; $\lambda=0\dots 1$ – поточний параметр, що визначає точку на кривій.

На рис. 2.10 наведений приклад зміни форми кривої при переміщенні керуючих точок.

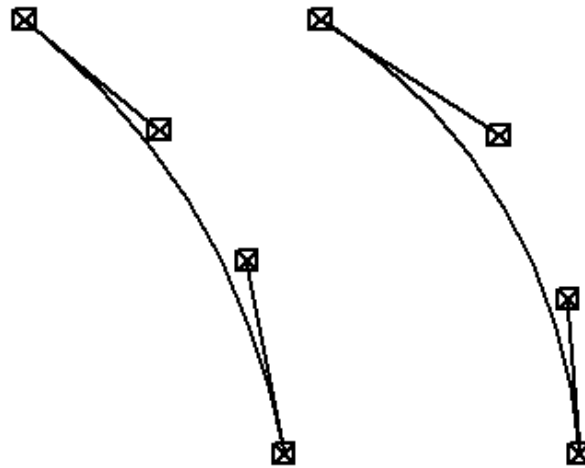


Рис. 2.10. Керування кривою за допомогою керуючих точок

Профільний кут визначається з виразу:

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{f_1'(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)}. \quad (2.17)$$

Тут

$$\begin{aligned} f_1'(\lambda, P_x) &= 3(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda^2 + 6(x_0 - 2x_1 + x_2)\lambda + 3(x_1 - x_0), \\ f_2'(\lambda, P_y) &= 3(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda^2 + 6(y_0 - 2y_1 + y_2)\lambda + 3(y_1 - y_0) \end{aligned} \quad (2.18)$$

– перші похідні функцій $f_1(\lambda, P_x)$ и $f_2(\lambda, P_y)$ по λ .

При аналізі геометрії і виведенні формул для визначення функцій якості необхідно знати другі похідні, які мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_1''(\lambda, P_x) &= 6(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda + 6(x_0 - 2x_1 + x_2), \\ f_2''(\lambda, P_y) &= 6(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda + 6(y_0 - 2y_1 + y_2). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Для того, щоб визначити інші ділянки профілю необхідно за допомогою дуги, дотичної до кривої робочої ділянки і прямих відрізків завершити побудову контуру [68].

Так як крива 1-2 дотична до відрізка 2-3 в точці 2, то і дуга, що продовжує цю криву, повинна бути дотичною до цього відрізка або його продовження (рис. 2.11).

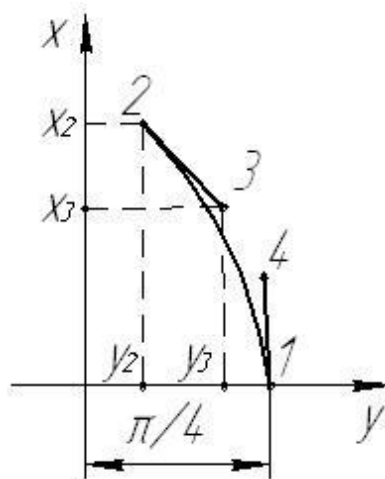


Рис. 2.11. Змінювана ділянка профілю

Розміри профілю приймаємо кратними модулю зачеплення m . На рис. 2.12 показані ділянки, що доповнюють профіль.

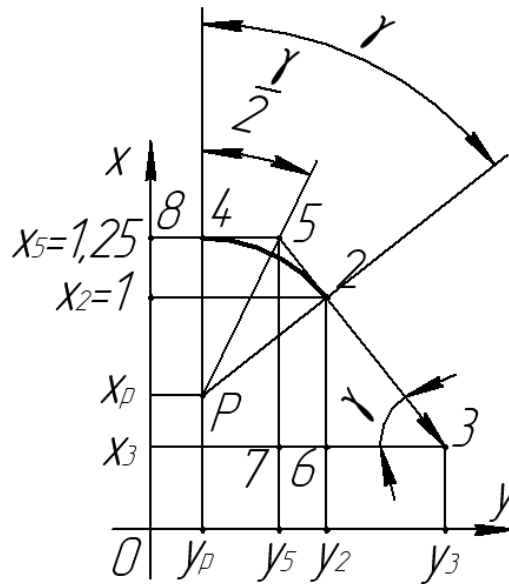


Рис. 2.12. Доповнюючі ділянки профілю

Отримаємо рівняння цих кривих в залежності від положення керуючої лінії 2-3.

Кут нахилу γ керуючої лінії 2-3 (рис. 2.12) визначимо за формулою:

$$\gamma = \arctg \frac{\Delta x_{23}}{\Delta y_{23}};$$

де $\Delta x_{23} = x_2 - x_3 = 1 - x_3$;
 $\Delta y_{23} = y_2 - y_3$.

Довжина керуючої лінії 2-3:

$$l_{23} = \sqrt{\Delta x_{23}^2 + \Delta y_{23}^2} = \Delta x_{23} \cdot \operatorname{ctg} \gamma$$

Довжину ділянки l_{52} , що продовжує лінію 2-3 до перетину з горизонтальною прямою з координатою $x_5 = 1,25$ визначимо,

використовуючи подібність трикутників: Δ_{573} та Δ_{263} :

$$l_{52} = l_{23} \left(\frac{\Delta x_{53}}{\Delta x_{23}} - 1 \right),$$

де $\Delta x_{53} = x_5 - x_3 = 1,25 - x_3$.

Кути $\angle_{632} = \angle_{4p2} = \gamma$, тобто лежать між взаємно перпендикулярними прямими.

Відрізок $p-5$ є бісектрисою кута \angle_{4p2} .

Прямокутні трикутники Δ_{4p5} та Δ_{5p2} рівні, тобто мають дві рівні сторони при вершині p . Отже, довжина відрізка 4-5:

$$l_{45} = l_{52}, \text{ а кут } \angle_{4p5} = \frac{\gamma}{2}.$$

Звідси знаходимо радіус дуги кола:

$$r_p = \frac{l_{45}}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} = l_{52} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}.$$

Координату y_5 знайдемо з подібності трикутників Δ_{573} та Δ_{263} :

$$y_5 = y_3 - \Delta y_{23} \cdot \frac{\Delta x_{53}}{\Delta x_{23}} = l_{85}.$$

Отже, координати центру дуги кола дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} x_p &= x_5 - r_p = 1,25 - r_p \\ y_p &= y_5 - l_{45} = y_5 - l_{52}. \end{aligned}$$

При керованій зміні кривої робочої ділянки за допомогою керуючих і

опорних точок можливі три варіанти побудови допоміжних ділянок:

1. $y_p \geq 0$;
2. $y_p < 0, \quad y_5 > 0$;
3. $y_5 \leq 0$.

У першому випадку додається дві ділянки – пряма 8-4 і дуга 4-2.

Координати прямої $x = 1,25 = \text{const}, \quad y = 0 \dots y_p$.

Координати дуги кола на ділянці 4-2 дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} x(\gamma) &= x_p + r_p \cdot \cos \gamma \\ y(\gamma) &= y_p + r_p \cdot \sin \gamma \end{aligned};$$

де $0^0 \leq \gamma \leq \angle_{632}$.

У другому випадку необхідно продовжити керуючу координатну лінію 2-3 до точки 9 (рис. 2.13) так, щоб центр дуги кола P^* лежав на координатній лінії OX .

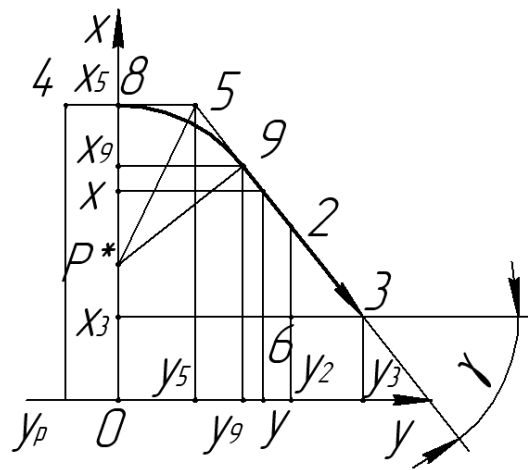


Рис. 2.13. Продовження керуючої координатної лінії

Довжина відрізка $l_{59} = l_{85} = y_5$.

Координати точки 9:

$$\begin{aligned}x_9 &= x_5 - l_{59} \cdot \sin \gamma = 1,25 - y_5 \sin \gamma \\y_9 &= y_5 + l_{59} \cdot \cos \gamma\end{aligned}$$

Радіус дуги кола

$$r_{p^*} = y_5 \cdot \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}$$

Координати центра дуги кола

$$\begin{aligned}x_{p^*} &= x_5 - r_{p^*} = 1,25 - r_{p^*} \\y_{p^*} &= 0\end{aligned}$$

Координати дуги кола на ділянці 8-9 будуть дорівнювати

$$\begin{aligned}x(\gamma) &= x_{p^*} + r_{p^*} \cdot \cos \gamma \\y(\gamma) &= r_{p^*} \cdot \sin \gamma\end{aligned},$$

де $0^0 \leq \gamma \leq \angle_{632}$.

Координати прямолінійної ділянки 9-2 будуть визначатись за формулами

$$\begin{aligned}x &= x_9 - (y - y_9) \cdot \operatorname{tg} \gamma \\y &= y_9 \dots y_2\end{aligned}.$$

У третьому випадку програма видає відповідь, що система не має рішень і необхідно змінити положення керуючих і опорних точок кривої Безьє.

Другу частину профілю визначимо в залежності від отриманих значень координат точок на кривих (рис. 2.14).

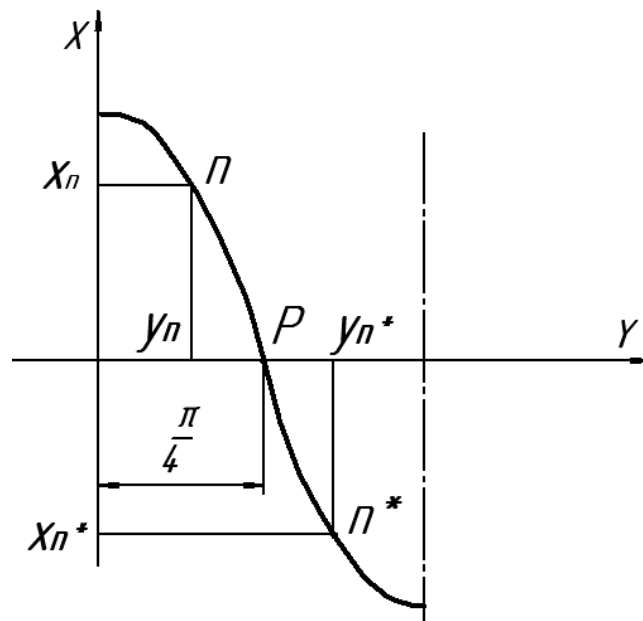


Рис. 2.14. Визначення значень координат точок на кривих

$$x_{n*} = -x_n$$

$$y_{n*} = \frac{\pi}{2} - y_n$$

Отримані результати дозволяють забезпечити автоматичну побудову допоміжних ділянок профілю зубчастих коліс при інтерактивному керуванні робочою ділянкою, описаною кривою Безьє 3-го порядку. Проаналізовано різні варіанти побудови допоміжних кривих.

Якщо допоміжні ділянки будуть описані кривою Безьє 3-го порядку, то бажано, щоб в точці стиковки основної і допоміжної ділянок була б загальна дотична і збігалися кривизни обох кривих [91].

Позначимо початкову криву через \bar{r}_n , а кінцеву – \bar{r}_k . Стикування буде відбуватись в опорній точці P_{3n} початкової кривої при $\lambda_n = 1$ та в опорній точці P_{0k} кінцевої кривої при $\lambda_k = 0$. Відповідно, координати цієї опорної точки повинні бути рівні:

$$x_{3n} = x_{0k}; \quad y_{3n} = y_{0k} . \quad (2.20)$$

Для того, щоб криві стикувалися по дотичній, необхідно, щоб перші похідні кривих в цій точці були рівні.

Перші похідні функцій $x(\lambda, P_x)$ та $y(\lambda, P_y)$ (2.16) по λ :

$$\begin{aligned} x'(\lambda, P_x) &= 3(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda^2 + 6(x_0 - 2x_1 + x_2)\lambda + 3(x_1 - x_0), \\ y'(\lambda, P_y) &= 3(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda^2 + 6(y_0 - 2y_1 + y_2)\lambda + 3(y_1 - y_0). \end{aligned}$$

Перші похідні початкової кривої при $\lambda_n = 1$ дорівнюють:

$$\begin{aligned} x'_n(1, P_{xn}) &= -3x_{2n} + 3x_{3n}, \\ y'_n(1, P_{yn}) &= -3y_{2n} + 3y_{3n}. \end{aligned}$$

Перші похідні кінцевої кривої при $\lambda_k = 0$ дорівнюють:

$$\begin{aligned} x'_k(0, P_{xk}) &= -3x_{0k} + 3x_{1k}, \\ y'_k(0, P_{yk}) &= -3y_{0k} + 3y_{1k}. \end{aligned}$$

Таким чином, для стикування по дотичній повинні виконуватися умови рівності перших похідних в точці стикування:

$$-x_{2n} + x_{3n} = -x_{0k} + x_{1k}; \quad (2.21)$$

$$-y_{2n} + y_{3n} = -y_{0k} + y_{1k}. \quad (2.22)$$

Для того, щоб згладити перехід від однієї кривої до іншої, необхідно зрівняти значення кривизни кривих в точці їх об'єднання.

Для плоскої кривої кривизна визначається за формулою:

$$K(\lambda, P_x, P_y) = \frac{y''(\lambda, P_y) \cdot x'(\lambda, P_x) - x''(\lambda, P_x) \cdot y'(\lambda, P_y)}{\left[\left(x'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(y'(\lambda, P_y) \right)^2 \right]^{3/2}}.$$

Другі похідні кривої Безьє 3-го порядку дорівнюють:

$$x''(\lambda, P_x) = 6(-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)\lambda + 6(x_0 - 2x_1 + x_2),$$

$$y''(\lambda, P_y) = 6(-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)\lambda + 6(y_0 - 2y_1 + y_2).$$

Другі похідні початкової кривої при $\lambda_n = 1$ дорівнюють:

$$x_n''(1, P_{xn}) = 6x_{1n} - 12x_{2n} + 6x_{3n},$$

$$y_n''(1, P_{yn}) = 6y_{1n} - 12y_{2n} + 6y_{3n}.$$

Другі похідні кінцевої кривої при $\lambda_k = 0$ дорівнюють:

$$x_k''(0, P_{xk}) = 6x_{0k} - 12x_{1k} + 6x_{2k},$$

$$y_k''(0, P_{yk}) = 6y_{0k} - 12y_{1k} + 6y_{2k}.$$

Після підстановки і перетворень кривизна початкової кривої в точці стикування дорівнює:

$$K_n(1, P_{xn}, P_{yn}) = \frac{2 \cdot [x_{1n} \cdot (y_{2n} - y_{3n}) + x_{2n} \cdot (y_{3n} - y_{1n}) + x_{3n} \cdot (y_{1n} - y_{2n})]}{3 \cdot [(x_{3n} - x_{2n})^2 + (y_{3n} - y_{2n})^2]^{3/2}}.$$

Кривизна кінцевої кривої:

$$K_k(0, P_{xk}, P_{yk}) = \frac{2 \cdot [x_{0k} \cdot (y_{1k} - y_{2k}) + x_{1k} \cdot (y_{2k} - y_{0k}) + x_{2k} \cdot (y_{0k} - y_{1k})]}{3 \cdot [(x_{1k} - x_{0k})^2 + (y_{1k} - y_{0k})^2]^{3/2}}.$$

У тому випадку, якщо будуть виконуватися умови рівності (2.20), (2.21), (2.22) і кривизни в точці стикування початкової і кінцевої кривих дорівнюватимуть

$$K_n(1, P_{xn}, P_{yn}) = K_k(0, P_{xk}, P_{yk}),$$

вдасться згладити перехід від кривої, яка описує робочу ділянку вихідного профілю твірної поверхні до кривої, яка описує ділянку його вершини.

2.4. Апроксимація кривими Безьє 3-го порядку

Підвищення ефективності систем автоматизованого проектування виробів, що мають складні поверхні, значною мірою залежить від математичного ядра, яке закладено в основу цих систем. Тому виникає необхідність у виборі таких залежностей для опису складних поверхонь, які найкращим чином використовують можливості сучасних комп'ютерних технологій [94].

За останні роки опубліковано велику кількість робіт, присвячених синтезу передач зачепленням. Результатом синтезу є математичний опис геометрії робочих поверхонь зубців твірної поверхні, зубчастих коліс, зуборізних інструментів. Залежно від обраних методів синтезу і оптимізації, математичного апарату, керованих параметрів одержувані опису геометрії у різних дослідників не мають однаковості. Це не дозволяє уніфікувати методику синтезу та оптимізації створюваних виробів.

Важливим завданням є розробка способів і методики перетворення геометрії складних поверхонь виробів та інструментальних поверхонь до єдиної форми математичного опису, зручного для використання в системах

автоматизованого синтезу виробів та аналізу процесу формоутворення.

При синтезі виробів, що мають складну форму поверхонь, геометрія поверхонь може бути представлена у вигляді різних залежностей. Якщо розглянути переріз зуба колеса або профіль твірної поверхні, то опис кривих може бути віднесено до певного класу – прямі, дуги кіл, евольвенти та інші, а також може бути представлено в табличній формі у вигляді набору точок. У загальному випадку будь-які залежності для опису профілю можна представити у вигляді набору точок і описати їх у виді таблиці значень. Однак в цьому випадку складно використовувати універсальну теорію для автоматизації оптимізаційного синтезу виробів і аналізу процесу формоутворення. Для цього бажано використовувати аналітично описані гладкі криві, які двічі диференціюються і мають мінімальну кількість керуючих елементів.

Будь-яку криву, представлену як аналітично, так і у виді таблиці можна апроксимувати з достатнім ступенем точності різного виду сплайнами. В якості універсального опису пропонуються криві і поверхні Безьє 3-го порядку, які широко використовуються в системах автоматизованого проектування і мають цілу низку властивостей, зручних для побудови математичних моделей керованого оптимізаційного синтезу виробів і аналізу процесу формоутворення.

Розглянемо два способи апроксимації кривих, представлених набором точок за допомогою кривих Безьє 3-го порядку.

Нижче наведено порядок дій при комп'ютерно-графічному методі. Цей алгоритм може бути реалізований в будь-якій сучасній CAD-системі.

1. Нехай задана крива, яка описується множиною точок з координатами X_i і Y_i (рис. 2.15).

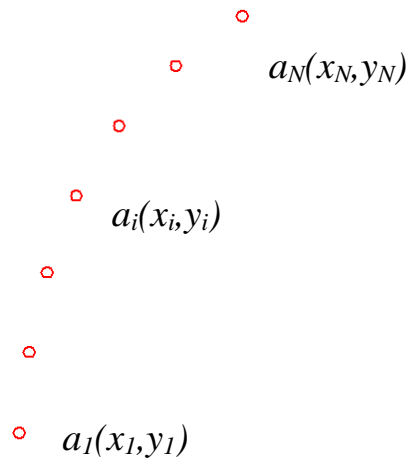



Рис. 2.15. Крива задана табличними даними X_i і Y_i

2. Вибираємо команду «Кривая Безье»  для побудови кривої, для цього вказуємо першу і останню точки заданої кривої (опорні точки для кривої Безье, рис. 2.16).

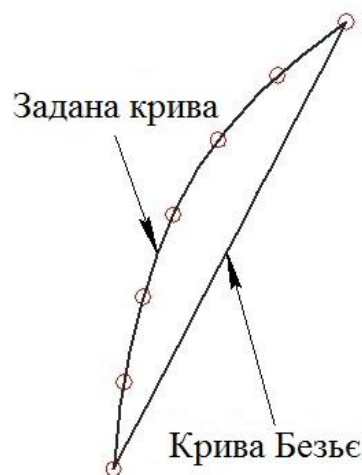
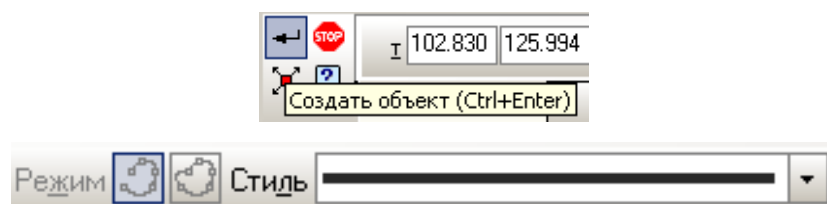


Рис. 2.16. Побудова кривої Безье

Натискаємо кнопку «Создать объект» на панелі спеціального керування.



3. Для аппроксимации кривої необхідно вибрати криву, для цього

потрібно клацнути по кривій Безьє двічі лівою кнопкою миші. Крива підсвітиться зеленим кольором, і з'являться керуючі точки, змінюючи положення яких можна змінювати криву (рис. 2.17).

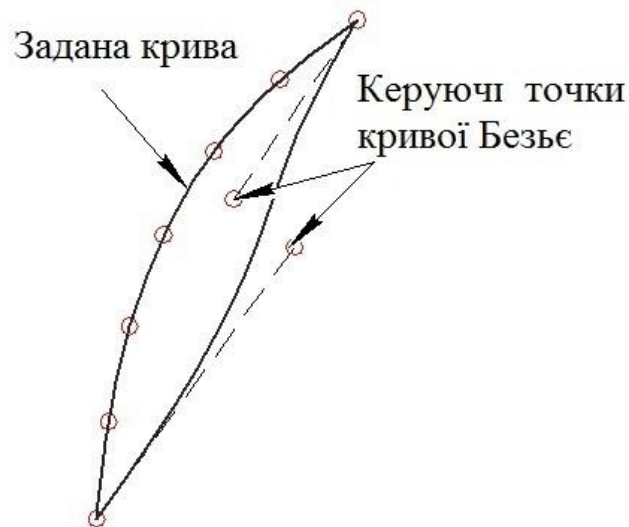


Рис. 2.17 Керування кривою Безьє за допомогою керуючих точок

Змінюючи положення точок, апроксимуємо представлену криву (рис. 2.18).



Рис. 2.18 Результат апроксимації кривої

В результаті виконаних дій отримуємо координати опорних і керуючих точок кривої, які в подальшому вносяться до відповідного вікна

розробленого програмного забезпечення «SAlAT» [236].

При аналітичному способі апроксимації необхідно використовувати один з алгоритмів оптимізації. Криву Безьє 3-го порядку можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x_i &= (1 - \lambda_i)^3 x_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i x_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 x_2 + \lambda_i^3 x_3, \\ y_i &= (1 - \lambda_i)^3 y_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i y_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 y_2 + \lambda_i^3 y_3. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Тут, x_i, y_i – поточні координати точок кривої, λ_i – поточний параметр, що змінюється в межах $0 \leq \lambda_i \leq 1$, і відповідний i -й точці кривої, x_0, y_0, x_3, y_3 – координати початкової P_0 та кінцевої P_3 опорних точок кривої, x_1, y_1, x_2, y_2 – координати керуючих точок P_1, P_2 .

При заданні кривої табличним способом відомі координати точок x_i, y_i . У разі апроксимації кривої Безьє 3-го порядку невідомими є координати керуючих точок P_1, P_2 та значення λ_i , відповідні i -им точкам кривої.

У задачі мінімізації відхилення точок кривої Безьє від заданих точок керованими параметрами є координати керуючих точок. Перебираючи значення x_1 и x_2 з першого рівняння системи, визначаємо значення $\lambda_i = f(x_i, x_1, x_2)$.

Цільову функцію визначимо, використовуючи метод найменших квадратів:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \min ,$$

де $\delta_i = y_i - y_{iB} = y_i - \left[(1 - \lambda_i)^3 y_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i y_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 y_2 + \lambda_i^3 y_3 \right]$ – відхилення поточних значень координат y_{iB} кривої Безьє, отриманих з другого рівняння системи (2.23) від заданих табличних значень y_i .

Для визначення оптимальних значень координат керуючих точок використовувався метод головних осей, розроблений Р.П. Брентом [273], який не вимагає інформації про градієнт функції.

На підставі цього методу було розроблено програмне забезпечення «APACE» [233].

Запропоновані комп'ютерно-графічний і аналітичний способи апроксимації представлених у виді таблиці профілів кривими Безьє 3-го порядку дозволяють уніфікувати опис геометрії функціональних поверхонь зубчастих коліс і зубооброблювальних інструментів, та представляти їх у вигляді, зручному для використання в системах автоматизованого синтезу зубчастих передач і зубооброблювальних інструментів, а також аналізу процесу формоутворення [4].

2.5. Формоутворення функціональних поверхонь на основі уніфікованих керуючих параметрів

Для отримання рівняння узагальненої функціональної поверхні з керуючими параметрами введемо систему координат S_I (рис. 2.19) [61]. Площина $Y_I O_I Z_I$ збігається з початковою площиною напрямної. Нехай в системі координат $X_I Y_I Z_I$ задана просторова крива, яка визначає поздовжню форму створюваної поверхні. Рівняння цієї кривої в загальному вигляді [218]:

$$\bar{r}_0(\mu, N) = x_0(\mu, N) \bar{i} + y_0(\mu, N) \bar{j} + z_0(\mu, N) \bar{k}, \quad (2.24)$$

де $x_0(\mu, N)$, $y_0(\mu, N)$, $z_0(\mu, N)$ – довільні функції, які необхідне число разів диференціюються по аргументу μ .

Якщо напрямна описана кривою Безьє 3-го порядку, то

$$\bar{r}_0(\mu, N) = \bar{f}_N(\mu) = (1 - \mu)^3 n_0 + 3(1 - \mu)^2 \mu \cdot n_1 + 3(1 - \mu) \cdot \mu^2 n_2 + \mu^3 n_3, \quad (2.25)$$

де $n_0=(y_0, z_0)$, $n_3=(y_3, z_3)$ – радіус-вектори опорних точок $n_1=(y_1, z_1)$, $n_2=(y_2, z_2)$ – радіус-вектори керуючих точок; $\mu = 0 \dots 1$ – поточний параметр, що визначає точку на кривій.

Рівняння інтерактивно керованої поверхні в системі координат S_I :

$$\bar{r}_1(\lambda, \mu) = f_1(P, N),$$

де $P=P(p_0, p_1, p_2, p_3)$, $N=N(n_0, n_1, n_2, n_3)$ – вектори керуючих і опорних точок з рівнянь (2.16) та (2.25).

Розташуємо початок системи координат $S_k(X_k O_k Y_k)$ на кривій (2.24) (рис. 2.19). При цьому вісь $O_k X_k$ спрямуємо по бінормалі, $O_k Y_k$ – по головній нормалі, $O_k Z_k$ – по дотичній до цієї кривої. Площину, паралельну площині $X_1 O_1 Y_1$, будемо називати *торцевою площиною функціональної поверхні*, а переріз функціональної поверхні такої площиною – *торцевим перерізом*. Переріз функціональної поверхні площиною $X_k O_k Y_k$ будемо називати *нормальним перерізом*.

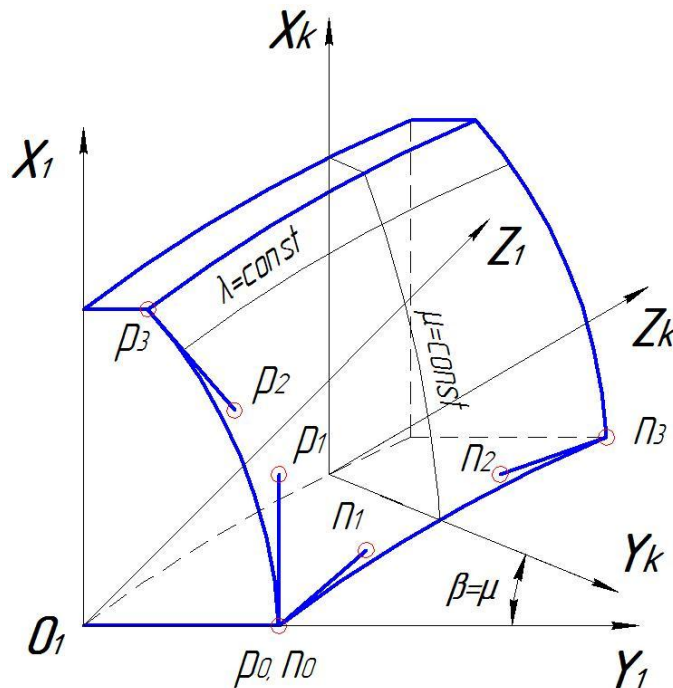


Рис. 2.19. Функціональна поверхня

Рівняння функціональної поверхні в системі координат S_n [218]:

$$\bar{r}_n(\lambda, \mu, P, N) = \bar{r}_0(\mu, N) + \bar{b}_n(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + \bar{n}_n(\mu, N) f_2(\lambda, P_y), \quad (2.26)$$

або в параметричній формі

$$\begin{aligned} x_n(\lambda, \mu, P, N) &= x_n(\mu, N) + b_{xn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{xn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y); \\ y_n(\lambda, \mu, P, N) &= y_n(\mu, N) + b_{yn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{yn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y); \\ z_n(\lambda, \mu, P, N) &= z_n(\mu, N) + b_{zn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{zn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y), \end{aligned} \quad (2.27)$$

де $b_{xn}(\mu, N)$, $b_{yn}(\mu, N)$, $b_{zn}(\mu, N)$ – напрямні косинуси біномалі (рис. 2.20), рівні

$$\begin{aligned} b_{xn}(\mu, N) &= \frac{\dot{y}_0 \ddot{z}_0 - \ddot{y}_0 \dot{z}_0}{k_b}; & b_{yn}(\mu, N) &= \frac{\dot{x}_0 \ddot{z}_0 - \ddot{x}_0 \dot{z}_0}{k_b}; \\ b_{zn}(\mu, N) &= \frac{\dot{x}_0 \ddot{y}_0 - \ddot{x}_0 \dot{y}_0}{k_b}; \end{aligned} \quad (2.28)$$

де $k_b = \sqrt{(\dot{y}_0 \ddot{z}_0 - \ddot{y}_0 \dot{z}_0)^2 + (\dot{x}_0 \ddot{z}_0 - \ddot{x}_0 \dot{z}_0)^2 + (\dot{x}_0 \ddot{y}_0 - \ddot{x}_0 \dot{y}_0)^2}$;

\dot{x}_0 , \dot{y}_0 , \dot{z}_0 , \ddot{x}_0 , \ddot{y}_0 , \ddot{z}_0 – перші і другі похідні від координат радіуса - вектора точки кривої (2.24) по параметру μ .

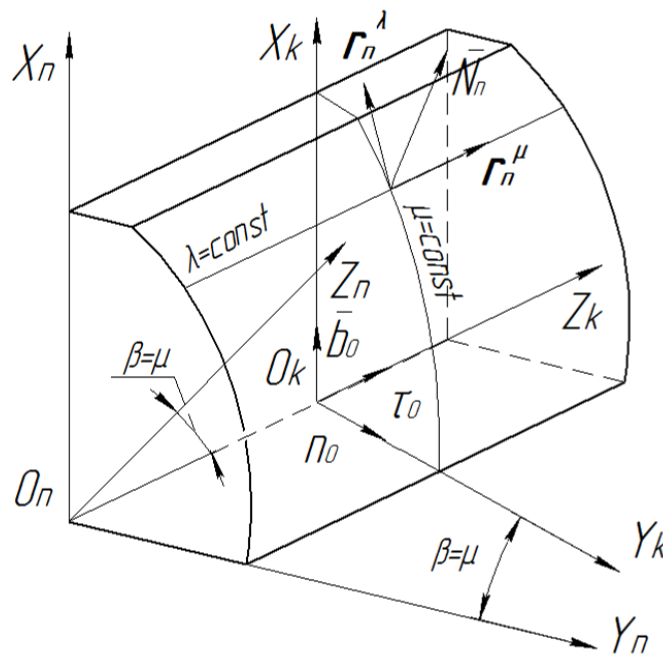


Рис. 2.20. Нормаль, біномаль і дотична в точці поверхні

$n_{xn}(\mu, N)$, $n_{yn}(\mu, N)$, $n_{zn}(\mu, N)$ – напрямні косинуси головної нормалі, рівні

$$\begin{aligned} n_{xn}(\mu, N) &= \frac{\dot{y}_0(\dot{x}_0\ddot{y}_0 - \ddot{x}_0\dot{y}_0) - \dot{z}_0(\dot{x}_0\ddot{z}_0 - \ddot{x}_0\dot{z}_0)}{k_n}, \\ n_{yn}(\mu, N) &= \frac{\dot{x}_0(\dot{x}_0\ddot{y}_0 - \ddot{x}_0\dot{y}_0) - \dot{z}_0(\dot{y}_0\ddot{z}_0 - \ddot{y}_0\dot{z}_0)}{k_n}, \\ n_{zn}(\mu, N) &= -\frac{\dot{x}_0(\dot{x}_0\ddot{z}_0 - \ddot{x}_0\dot{z}_0) + \dot{y}_0(\dot{y}_0\ddot{z}_0 - \ddot{y}_0\dot{z}_0)}{k_n}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

де

$$k_n = \sqrt{[\dot{y}_0(\dot{x}_0\ddot{y}_0 - \ddot{x}_0\dot{y}_0) - \dot{z}_0(\dot{x}_0\ddot{z}_0 - \ddot{x}_0\dot{z}_0)]^2 + [\dot{x}_0(\dot{x}_0\ddot{y}_0 - \ddot{x}_0\dot{y}_0) - \dot{z}_0(\dot{y}_0\ddot{z}_0 - \ddot{y}_0\dot{z}_0)]^2 + [\dot{x}_0(\dot{x}_0\ddot{z}_0 - \ddot{x}_0\dot{z}_0) + \dot{y}_0(\dot{y}_0\ddot{z}_0 - \ddot{y}_0\dot{z}_0)]^2}$$

Напрямні косинуси дотичної:

$$\tau_{xn} = \frac{\dot{x}_0}{k_\tau}; \quad \tau_{yn} = \frac{\dot{y}_0}{k_\tau}; \quad \tau_{zn} = \frac{\dot{z}_0}{k_\tau}, \quad (2.30)$$

де $k_\tau = \sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + \dot{z}_0^2}$.

Отже, з огляду на наведене вище:

– напрямні косинуси бінормалі рівні:

$$b_{xn}(\mu, N) = 1, \quad b_{yn}(\mu, N) = 0, \quad b_{zn}(\mu, N) = 0;$$

– напрямні косинуси головної нормалі рівні:

$$n_{xn}(\mu, N) = 0, \quad n_{yn}(\mu, N) = \frac{\dot{z}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}}, \quad n_{zn}(\mu, N) = -\frac{\dot{y}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}};$$

– напрямні косинуси дотичної рівні:

$$\tau_{xn}(\mu, N) = 0; \tau_{yn}(\mu, N) = \frac{\dot{y}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}}; \tau_{zn}(\mu, N) = \frac{\dot{z}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}};$$

де \dot{y}_n, \dot{z}_n – похідні від координат радіуса-вектора точки кривої по параметру μ .

Гострий кут β між віссю $O_l Z_l$ і дотичною $\bar{\tau}_n$ кривою (2.24) будемо називати *кутом нахилу зубців функціональної поверхні*. З урахуванням залежності (2.30) цей кут визначається співвідношеннями:

$$\cos \beta = \frac{\dot{z}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}}; \sin \beta = \frac{\dot{y}_n}{\sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}}. \quad (2.31)$$

Підставляючи значення напрямних косинусів (2.30) і (2.31) у (2.27), отримаємо рівняння функціональної поверхні в системі координат S_n .

Задати поздовжню форму зуба різального інструменту просторовою кривою на практиці здійснити складно. Більш реальний випадок, коли поздовжня форма зуба задана плоскою кривою, довільно розташованою в просторі. Розглянемо цей випадок, задавши координату $x_n = 0$ (крива лежить в площині $Y_n O_n Z_n$). Тоді рівняння узагальненої функціональної поверхні в системі координат S_n буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} x_n(\lambda, \mu, P, N) &= f_1(\lambda, P_x); \\ y_n(\lambda, \mu, P, N) &= y_0(\mu, N) + f_2(\lambda, P_y) \cos \beta; \\ z_n(\lambda, \mu, P, N) &= z_0(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Функціональна поверхня для формування перехідної поверхні зубців визначається рівнянням (2.32), де замість $f_1(\lambda, P_x)$ і $f_2(\lambda, P_y)$ необхідно

підставити значення функцій, що визначають перехідну криву профіля.

При $z_n = const$ отримаємо торцевий переріз функціональної поверхні, а при $\beta = const$ – нормальний переріз.

Функціональною поверхнею може виступати поверхня зуба твірного колеса. Для профіля у виді сплайна рівняння твірного прямозубого колеса, з урахуванням виразів (2.16) в рухомій системі координат $S_1(x_1y_1z_1)$, буде мати вигляд:

$$x_1 = f_1(\lambda, P_x) - r_1; \quad y_1 = f_2(\lambda, P_y); \quad z_1 = \mu \quad (2.33)$$

У векторній формі рівняння циліндричного прямозубого колеса з будь-яким профілем можна записати наступним чином:

$$\vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N) = [f_1(\lambda, P_x) - r_1]\vec{i} + f_2(\lambda, P_y)\vec{j} + \mu\vec{k} \quad (2.34)$$

Рівняння циліндричного косозубого колеса в рухомій системі координат $x_1y_1z_1$ можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x_1 &= [f_1(\lambda, P_x) - r_1]\cos\mu - f_2(\lambda, P_y)\sin\mu \\ y_1 &= [f_1(\lambda, P_x) - r_1]\sin\mu + f_2(\lambda, P_y)\cos\mu \\ z_1 &= P\mu \end{aligned}$$

де $P = T/2\pi$.

Як приклад розглянемо керування твірною поверхнею, профіль якої описаний кривої Безьє третього порядку (2.16), а поздовжня лінія зуба дугою кола (2.4) [64], [86].

Рівняння твірної поверхні має вигляд:

$$\begin{aligned} x_n(P, N) &= f_1(\lambda, P_x); \\ y_n(P, N) &= R_u(\cos\beta_0 - \cos\beta) + f_2(\lambda, P_y)\cos\beta; \\ z_n(P, N) &= R_u(\sin\beta - \sin\beta_0) - f_2(\lambda, P_y)\sin\beta. \end{aligned}$$

На рисунку 2.21 показана твірна поверхня з круговою лінією зуба.

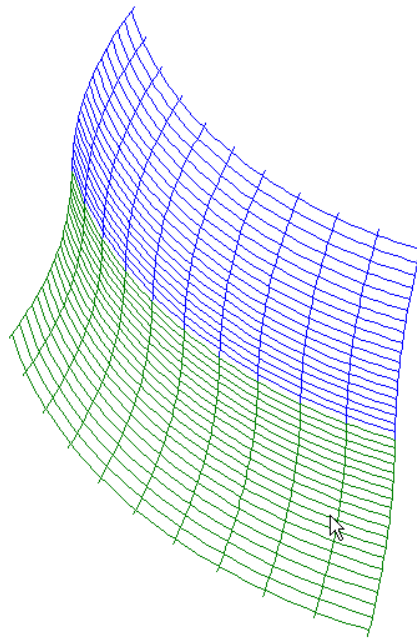


Рис. 2.21. Твірна поверхня з круговою лінією зуба

На підставі запропонованої теорії було розроблене програмне забезпечення «COSET» [235].

2.6. Внутрішня геометрія функціональних поверхонь

При дослідженні геометрії функціональних поверхонь в задачах гідро- і газодинаміки, а також для отримання геометричних і кінематичних показників контактуючих поверхонь в процесі формоутворення і експлуатації необхідні такі елементи функціональної поверхні, як нормаль та її проекції на осі координат, коефіцієнти першої та другої квадратичних форм, нормальні кривизни в заданих напрямках.

Вектор нормалі визначається формулою [218]

$$\bar{N}_n = \bar{r}_n^\lambda \times \bar{r}_n^\mu, \quad (2.35)$$

де \bar{r}_n^λ й \bar{r}_n^μ – частинні похідні радіус-вектора функціональної поверхні (2.32)

по λ і по μ відповідно:

$$\begin{aligned}\bar{r}_n^\mu &= |\bar{r}_n'| \cdot [1 - Kf_2(\lambda, P_y)] \cdot (\sin \beta \bar{j} + \cos \beta \bar{k}); \\ \bar{r}_n^\lambda &= f_1'(\lambda, P_x) \bar{i} + f_2'(\lambda, P_y) \cos \beta \bar{j} - f_2'(\lambda, P_y) \sin \beta \bar{k},\end{aligned}\tag{2.36}$$

де $f_1'(\lambda, P_x) = 3(1 - \lambda)^2(x_1 - x_0) + 6\lambda(1 - \lambda)(x_2 - x_1) + 3\lambda^2(x_3 - x_2)$,

$$f_2'(\lambda, P_y) = 3(1 - \lambda)^2(y_1 - y_0) + 6\lambda(1 - \lambda)(y_2 - y_1) + 3\lambda^2(y_3 - y_2) -$$

– похідні функції $f_1(\lambda, P_x)$ и $f_2(\lambda, P_y)$ по λ ;

$|\bar{r}_n'| = \sqrt{\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2}$ – модуль похідної радіуса-вектора кривої (2.24);

$$K = -\frac{\ddot{z}_0 \dot{y}_0 - \ddot{y}_0 \dot{z}_0}{(\dot{y}_0^2 + \dot{z}_0^2)^{3/2}} - \text{кривизна кривої (2.24).}$$

Підставляючи (2.36) в (2.32), отримаємо проекції вектора нормалі до функціональної поверхні:

$$\begin{aligned}N_{xn} &= -|\bar{r}_n'| \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y)) \cdot f_2'(\lambda, P_y); \\ N_{yn} &= |\bar{r}_n'| \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y)) \cdot f_1'(\lambda, P_x) \cos \beta; \\ N_{zn} &= -|\bar{r}_n'| \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y)) \cdot f_1'(\lambda, P_x) \sin \beta.\end{aligned}\tag{2.37}$$

У зв'язку з тим, що модуль вектора нормалі дорівнює:

$$|\bar{N}_n| = |\bar{r}_n'| \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y)) \times \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2},\tag{2.38}$$

то одиничний вектор нормалі в параметричній формі:

$$\begin{aligned}
e_{xn} &= -\frac{f_2'(\lambda, P_y)}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}; \\
e_{yn} &= \frac{f_1'(\lambda, P_x) \cos \beta}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}; \\
e_{zn} &= -\frac{f_1'(\lambda, P_x) \sin \beta}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}},
\end{aligned} \tag{2.39}$$

або,

$$e_{xn} = -\sin \alpha; \quad e_{yn} = \cos \alpha \cos \beta; \quad e_{zn} = -\cos \alpha \sin \beta. \tag{2.40}$$

Коефіцієнти першої квадратичної форми в загальному випадку рівні [132]:

$$\begin{aligned}
E_n &= (x_n^\lambda)^2 + (y_n^\lambda)^2 + (z_n^\lambda)^2 = (\bar{r}_n^\lambda)^2; \\
F_n &= x_n^\lambda x_n^\mu + y_n^\lambda y_n^\mu + z_n^\lambda z_n^\mu = \bar{r}_n^\lambda \bar{r}_n^\mu; \\
G_n &= (r_n^\mu)^2.
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Для поверхні (2.27) з урахуванням (2.36) отримаємо

$$\begin{aligned}
E_n &= [f_1'(\lambda, P_x)]^2 + [f_2'(\lambda, P_y)]^2; \\
F_n &= 0; \\
G_n &= |\bar{r}_0'|^2 \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y))^2 = (\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2) \cdot (1 - Kf_2(\lambda, P_y))^2
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Коефіцієнти другої квадратичної форми [218]

$$\begin{aligned}
L_n &= e_{xn} \frac{\partial^2 x_n}{\partial \lambda^2} + e_{yn} \frac{\partial^2 y_n}{\partial \lambda^2} + e_{zn} \frac{\partial^2 z_n}{\partial \lambda^2} = \bar{e}_n \frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \lambda^2}; \\
M_n &= e_{xn} \frac{\partial^2 x_n}{\partial \lambda \partial \mu} + e_{yn} \frac{\partial^2 y_n}{\partial \lambda \partial \mu} + e_{zn} \frac{\partial^2 z_n}{\partial \lambda \partial \mu} = \bar{e}_n \frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \lambda \partial \mu}; \\
N_n &= e_{xn} \frac{\partial^2 x_n}{\partial \mu^2} + e_{yn} \frac{\partial^2 y_n}{\partial \mu^2} + e_{zn} \frac{\partial^2 z_n}{\partial \mu^2} = \bar{e}_n \frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \mu^2}.
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Знайдемо другі похідні радіуса-вектора твірної поверхні по λ і по μ :

$$\frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \lambda^2} = f_1''(\lambda, P_x) \bar{i} + f_2''(\lambda, P_y) \cos \beta \bar{j} - f_2''(\lambda, P_y) \sin \beta \bar{k}; \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \lambda \partial \mu} = -K f_2'(\lambda, P_y) \cdot (\dot{y}_n \bar{j} + \dot{z}_n \bar{k}); \tag{2.45}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \bar{r}_n}{\partial \mu^2} &= [\ddot{y}_n (1 - K f_2(\lambda, P_y)) - K' \dot{y}_n f_2(\lambda, P_y)] \cdot \bar{j} + \\
&+ [\ddot{z}_n (1 - K f_2(\lambda, P_y)) - K' \dot{z}_n f_2(\lambda, P_y)] \cdot \bar{k}
\end{aligned} \tag{2.46}$$

де $f_1''(\lambda, P_x)$ и $f_2''(\lambda, P_y)$ – другі похідні функцій $f_1(\lambda, P_x)$ і $f_2(\lambda, P_y)$ по λ (2.19).

Підставивши (2.44), (2.45) і (2.46) в (2.43), отримуємо залежності для визначення коефіцієнтів другої квадратичної форми:

$$\begin{aligned}
L_n &= -f_1''(\lambda, P_x) \sin \alpha + f_2''(\lambda, P_y) \cos \alpha; \\
M_n &= 0; \\
N_n &= K \cos \alpha \cdot (\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2) \cdot [1 - K f_2(\lambda, P_y)].
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Співвідношення (2.42) і (2.47) залежать від функцій, які визначають

вихідний контур і подовжню форму зубців твірної поверхні. Вони носять узагальнений характер і справедливі для зубчастих рейок загального вигляду.

Нормальна кривизна функціональної поверхні в загальному вигляді може бути визначена залежністю [218]

$$K = \frac{L_n d\lambda^2 + 2M_n d\lambda d\mu + N_n d\mu^2}{E_n d\lambda^2 + 2F_n d\lambda d\mu + G_n d\mu^2}, \quad (2.48)$$

де $d\lambda$ і $d\mu$ – диференціали координатних ліній λ та μ .

Напрямок, в якому визначається кривизна, залежить від значень $d\lambda$ і $d\mu$. Так, наприклад, кривизна вздовж ліній $\lambda = \text{const}$, ($d\lambda = 0$) (рис. 2.20) дорівнює:

$$K_\mu = \frac{N_n}{G_n} = \frac{K \cos \alpha}{1 - K f_2(\lambda, P_y)}, \quad (2.49)$$

а кривизна вздовж ліній $\mu = \text{const}$, таким чином кривизна профілю (рис. 2.20), дорівнює

$$K_\lambda = \frac{L_n}{E_n} = \frac{f_1'(\lambda, P_x) f_2''(\lambda, P_y) - f_1''(\lambda, P_x) f_2'(\lambda, P_y)}{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.50)$$

Так як для даної функціональної поверхні коефіцієнти квадратичних форм $F_n = 0$ і $M_n = 0$, координатні лінії $\lambda = \text{const}$ і $\mu = \text{const}$ є лініями кривизни, а нормальні кривизни K_μ і K_λ – головними кривизнами поверхні (2.27).

Висновки до розділу 2

1. Засновані на єдиній параметричній базі, в основі якої лежать уніфіковані керуючі параметри, комп'ютерно-інтегровані системи формоутворення дозволяють автоматизувати процес формоутворення, забезпечити інтерактивне керування всіма елементами системи формоутворення з одночасним візуальним аналізом її ефективності.

2. Математичний опис поверхні, приведений до універсального виду на базі уніфікованих керуючих параметрів забезпечує апроксимацію точкового подання цих поверхонь сплайновими поверхнями і створює основу для використання єдиних методик, алгоритмів і програмного забезпечення при автоматизації процесу формоутворення, що в сукупності забезпечує як підвищення точності опису та виготовлення функціональних поверхонь деталей, так і підвищення ефективності процесу формоутворення.

3. Інтерактивне керування формоутворенням функціональних поверхонь зубчастих коліс доцільно здійснювати двома способами: шляхом розміщення вихідної поверхні за допомогою функціональних залежностей геометрії поверхні і параметрів простору та, в подальшому, перетворення простору разом з поверхнею щодо нерухомого простору; шляхом зміни внутрішніх параметрів функціональних залежностей, що описують функціональну поверхню.

4. Політканинні перетворення як один із способів деформації простору дозволяє керувати геометрією аналітично заданої поверхні з будь-яким її математичним представленням і створювати комп'ютерно-інтегровані системи формоутворення, засновані на єдиному математичному описі із загальними керуючими параметрами. Складність застосування політканинних перетворень полягає в необхідності встановлення первинних функціональних зв'язків з новою системою для кожного виду математичного опису поверхонь.

5. В якості другого способу формоутворення функціональних

поверхонь доцільно використовувати опис поверхонь за допомогою сплайнів, з яких в автоматизованих системах проектування найбільш ефективними для забезпечення інтерактивного керування за допомогою керуючих точок є криві Безьє і NURBS.

6. Для отримання геометричних і кінематичних показників контактуючих поверхонь в процесі формоутворення і експлуатації отримані математичні вирази, що залежать від уніфікованих керуючих параметрів, які описують такі елементи функціональної поверхні, як нормаль та її проекції на осі координат, коефіцієнти першої та другої квадратичних форм, нормальні кривизни в заданих напрямках.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [4], [27], [64], [68], [61], [73], [79], [86], [87], [91], [94], [126], [225], [233], [234], [235], [236].

РОЗДІЛ 3

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ОПИС ФУНКЦІЇ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Для створення комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс необхідно розробити нові підходи до узагальненого опису параметрів функції формоутворення, уніфікувати її математичне подання та проаналізувати можливості підвищення ефективності її використання.

При параметричному описі функції формоутворення доцільно використовувати матричне подання, яке дозволить переходити від одного класу схеми формоутворення до іншого в інтерактивному режимі.

Особливий інтерес представляє класична класифікація кінематичних схем формоутворення, запропонована професором П.Р. Родіним [231]. На її основі можлива розробка математичного забезпечення ідеального процесу формоутворення з використанням керуючих уніфікованих параметрів.

Необхідно, також, розглянути нові можливостей використання кінематичних схем формоутворення 3-го класу в частині розширення способів взаємодії контактуючих елементів.

3.1. Кінематичні схеми формоутворення 3-го класу

3.1.1. Третій тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу

Завдання проектування високопродуктивного та якісного інструменту, безумовно, є актуальними. Проектування інструменту ґрунтується на теорії формоутворення поверхонь, яка продовжує розвиватися і вдосконалюватися.

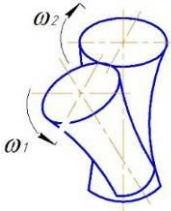
В роботі [231] розглядаються кінематичні схеми формоутворення поверхонь при поєднанні прямолінійно-поступального і обертального рухів. Заслуговує на увагу третій клас кінематичних схем формоутворення, який характеризується тим, що рух поверхні деталі щодо інструменту буде

миттєвим гвинтовим рухом, який є результатом двох обертань навколо перехресних осей.

Класифікація третього типу кінематичних схем формоутворення 3-го класу, розроблених професором Родіним П.Р. приведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Третій тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу

Клас схеми	Тип схеми	Відносний рух виробу та інструменту при профілюванні		Подання відносного руху за допомогою аксоїдів	Ескіз взаємного розташування аксоїдів	Аксоїд	
		Складові	Сумарне миттєве			Інструмента	Виробу
3	3	Два обертання навколо перехресних осей	Гвинтове	Кочення з ковзанням гіперboloїда по гіперboloїду		Гіперboloїд	Гіперboloїд

«Аналітичну залежність, що зв'язує переміщення ланок формотворною системи з траєкторією руху точок інструменту щодо оброблюваної деталі в системі координат оброблюваної деталі, будемо називати *функцією формоутворення*» [229].

«Для побудови функції формоутворення найбільш зручний математичний апарат перетворення координат, що використовує матриці і вектори четвертого порядку, застосування яких для виведення і аналізу рівнянь поверхонь в тривимірному просторі широко відомо з теорії зубчастих зачеплень і аналізу механіки роботів» [175].

Матричне подання функції формоутворення має вигляд:

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{62p}(\varphi_2) \cdot M_{1pl}(a_w) \cdot M_{4lm}(\gamma) \cdot M_{3m0}(0) \cdot M_{601}(\varphi_1) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N),$$

де M позначає матрицю, а цифри після неї характеризують елементарні рухи: 1, 2, 3 – елементарні переміщення, відповідно уздовж осей X , Y , Z , а 4, 5, 6 – елементарні обертання, відповідно навколо осей X , Y , Z . Індекси показують,

які системи координат пов'язує відповідна матриця M . У дужках вказані керуючі параметри, що впливають на структуру взаємодії спряжених поверхонь.

На рис. 3.1 зображені системи координат кінематичних схем формоутворення 3-го класу.

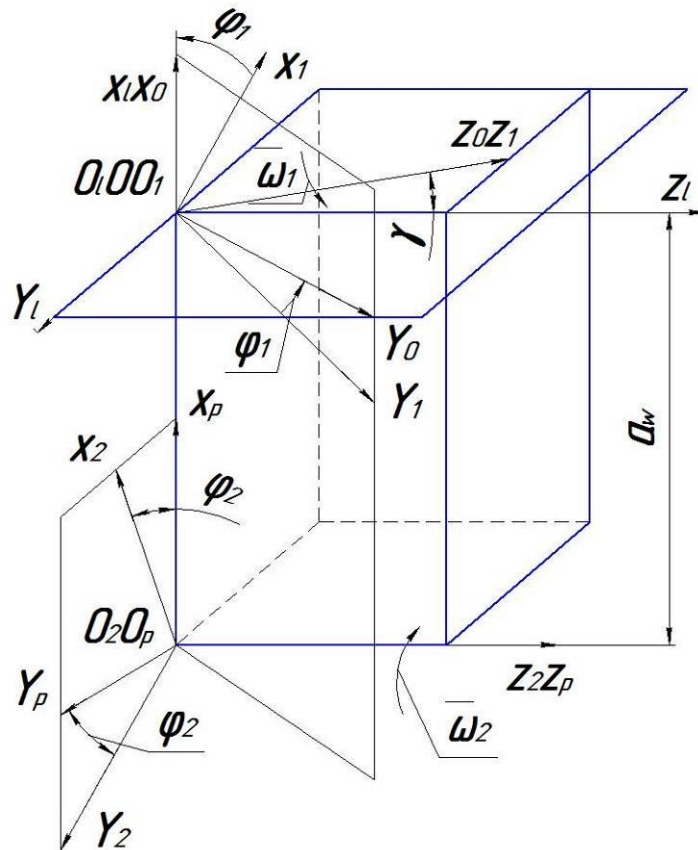


Рис. 3.1. Системи координат для кінематичних схем формоутворення 3-го класу

Для того, щоб отримати інструментальну поверхню, крім функції формоутворення потрібно враховувати зв'язки, які пов'язують відносне переміщення заготовки та інструменту.

«Всі L зв'язків, які наявні у верстаті при обробленні певної поверхні, складаються з зв'язків огинання $L_{ог}$, прихованих зв'язків $L_{ск}$ та функціональних зв'язків $L_{ф}$:

$$L = L_{ог} + L_{ск} + L_{ф},$$

причому в конкретних випадках будь-які з цих видів зв'язків як в окремих

випадках, так і сукупно можуть бути відсутніми, що відповідає оберненню в нуль певних доданків» [229].

«При обробці на металорізальних верстатах вельми поширені випадки, коли оброблювана поверхня виходить такою, яка огинає сімейства миттєвих положень різальних крайок інструменту. Виникаючі при цьому зв'язки між змінними називаються зв'язками огинання; вони органічно властиві схемі обробки і не вимагають для своєї реалізації будь-яких настроювальних вузлів» [229].

У нашому випадку зв'язок огинання знаходиться кінематичним способом:

$$\vec{n}_1 \vec{V}_1^{(12)} = 0,$$

де \vec{n}_1 – вектор нормалі до поверхні; $\vec{V}_1^{(12)}$ – відносна швидкість ковзання.

«Група функціональних зв'язків, на відміну від зв'язків огинання і прихованих, дозволяє змінювати швидкості або співвідношення між швидкостями вузлів формотворної системи, так як вони реалізуються або за допомогою апаратних пристроїв (гітари, кулачки і т.і.), або за допомогою програмних модулів в верстатах з ЧПК. Функціональні зв'язки завжди можуть бути представлені як у вигляді рівнянь, що включають швидкості руху ланок, так і у вигляді рівняння зв'язку між координатами цих рухів, що виходить в результаті інтегрування вихідної швидкісної залежності» [229].

У нашому випадку функціональний зв'язок являє передавальне число

$$u = \omega_2 / \omega_1,$$

де ω_1 и ω_2 – кутові швидкості обертання ланок.

3.1.2. Четвертий тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу

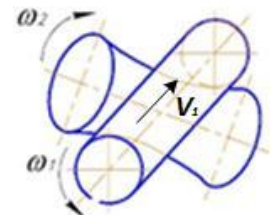
Розвиток теорії формоутворення дозволяє розширити можливості взаємодії спряжених поверхонь і розглядати нові типи схем формоутворення, на основі яких можна створювати інструменти з покращеними

властивостями.

В класифікацію кінематичних схем формоутворення необхідно включити четвертий тип кінематичної схеми формоутворення 3-го класу, представлений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Четвертий тип кінематичної схеми формоутворення 3-го класу

Клас схеми	Тип схеми	Відносний рух виробу та інструменту при профілюванні		Подання відносного руху за допомогою аксоїдів	Ескіз взаємного розташування аксоїдів	Аксоїд	
		Складові	Сумарне миттєве			Інструмента	Виробу
3	4	Два обертання навколо перехресних осей, поступальний рух уздовж осі циліндра	Гвинтове	Кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру		Гіперболоїд Циліндр	Циліндр Гіперболоїд

Проведемо аналіз кінематичної схеми формоутворення третього класу, в основі якого лежить взаємодія аксоїдів циліндра і тіла, типу «однопорожнинний гіперболоїд», яка є новою, не вивченою її різновидністю [90].

Розглянемо процес шліфування на перехресних осях деталі циліндричним шліфувальним кругом (рис. 3.2).

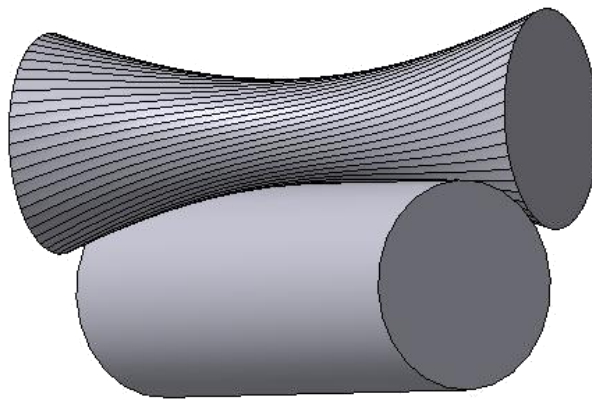


Рис. 3.2. Пара: циліндр – тіло, типу «однопорожнинний гіперболоїд»

Матричне подання четвертого типу кінематичної схеми формоутворення 3-го класу має вигляд

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{62p}(\varphi_2) \cdot M_{1pl}(a_w) \cdot M_{4lm}(\gamma) \cdot M_{3m0}(z_1) \cdot M_{601}(\varphi_1) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N).$$

Тут зв'язки огинання і функціональні зв'язки аналогічні попередньому випадку. Зв'язок огинання

$$\vec{n}_1 \vec{V}_1^{(12)} = 0$$

Функціональні зв'язок

$$u = \omega_2 / \omega_1$$

Але в цьому випадку додається прихований зв'язок. «При дублюванні однакових рухів різними вузлами верстата або при збігу огинаючої сімейства миттєвих положень поверхні інструменту з самою поверхнею утворюються приховані зв'язки між узагальненими координатами формотворною системи. Фізично такий зв'язок відповідає наявності «зайвого» руху, без якого процес формоутворення все одно був би можливий» [229].

Прихований зв'язок виникає у вигляді поступальної швидкості переміщення циліндричного інструменту уздовж своєї осі:

$$V_1 = z_1 / t \text{ (мм/сек),}$$

де z_1 – відстань, на яку переміститься інструмент (мм); t – час, за який відбуватиметься рух.

Для дослідження зачеплення з перехресними осями використовуємо три системи координат (рис. 3.3): рухомі системи $x_1 y_1 z_1$ і $x_2 y_2 z_2$, пов'язані,

відповідно, з циліндричним зубчастим колесом 1 і шуканим гіперболоїдним інструментом 2 , і нерухому систему xuz , щодо якої будемо задавати положення рухомих систем координат. Осями обертання ланок є відповідно z_1 і z_2 , γ – кут схрещування осей; a_w – найкоротша міжосьова відстань.

Перехід від нерухомої системи координат xuz до рухомої $x_2y_2z_2$ зробимо в два прийоми: 1) перенесемо початок координат O_1 у O_2 і повернемо систему координат навколо осі x так, щоб кут між осями z і z_p став рівним γ ; тоді система xuz прийме положення $x_pu_pz_p$; 2) далі повернемо систему $x_pu_pz_p$ навколо z_p на кут φ_2 , в результаті чого система $x_pu_pz_p$ перейде у $x_2y_2z_2$. Система координат $x_pu_pz_p$ є допоміжною і використовується лише при виведенні формул перетворення.

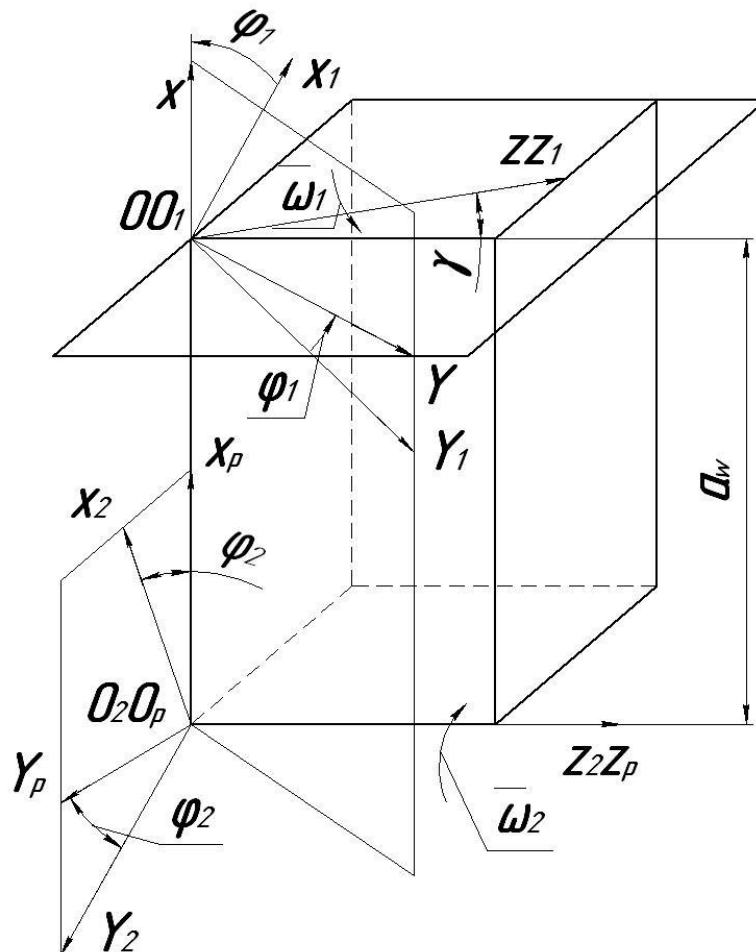


Рис. 3.3. Системи координат

На рис. 3.3 наведено випадок, коли для спостерігача, який дивиться з боку додатних напрямків осей z_1 і z_2 , спряжені колеса 1 і 2 обертаються проти годинникової стрілки.

Вивод формул перетворень координат, припускаючи, що перехід відбувається від системи координат S_1 до S_2 , ґрунтується на такому записі

$$\vec{r}_2 = M_{2p} M_{po} M_{o1} \cdot \vec{r}_1 = M_{21} r_1, \quad (3.1)$$

де \vec{r}_1, \vec{r}_2 – матриці-стовпці радіусів-векторів \vec{r}_1, \vec{r}_2 однієї і тієї ж точки в системах S_1, S_2 ;

M_{01} – матриця переходу від S_1 до S_0 ;

M_{2p} – матриця переходу від S_p до S_2 ;

M_{21} – результуюча матриця для переходу від S_1 до S_2 .

Запишемо формули перетворення прямокутних координат при повороті осей. Тоді перехід від рухомої системи координат $S_1(x_1 y_1 z_1)$ до нерухомої системи $S(x y z)$ можна записати в такому вигляді [43]:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 \\ y &= x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1 \\ z &= z_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Далі запишемо формули перетворення прямокутних координат при паралельному перенесенні і повороті осей. Тоді перехід від нерухомої системи координат $S_0(x y z)$ до допоміжної системи $S_p(x_p y_p z_p)$ запишемо в такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x + a_w \\ y_p &= y \cos \gamma - z \sin \gamma \\ z_p &= y \sin \gamma + z \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Підставляючи в вирази (3.3) значення (3.2), отримуємо

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w \\ y_p &= (x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cos \gamma - z_1 \sin \gamma \\ z_p &= (x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \sin \gamma + z_1 \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Записуючи формули переходу від допоміжної системи $S_p(x_p y_p z_p)$ до рухомої системи $S_2(x_2 y_2 z_2)$ отримаємо

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_p \cos \varphi_2 + y_p \sin \varphi_2 \\ y_2 &= -x_p \sin \varphi_2 + y_p \cos \varphi_2 \\ z_2 &= z_p \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Підставляючи в вирази (3.5) вирази (3.4), отримуємо

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= (x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w) \cos \varphi_2 + [(x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cos \gamma - \\ &\quad - z_1 \sin \gamma] \sin \varphi_2 \\ y_2 &= -(x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w) \sin \varphi_2 + [(x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cos \gamma - \\ &\quad - z_1 \sin \gamma] \cos \varphi_2 \\ z_2 &= (x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \sin \gamma + z_1 \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Формули переходу від S_2 до S_1 мають такий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 x_1 &= x_2 (\cos \varphi_1 \cos \varphi_1 i_{21} + \cos \gamma \sin \varphi_1 \sin \varphi_1 i_{21}) + \\
 &\quad + y_2 (-\cos \varphi_1 \sin \varphi_1 i_{21} + \cos \gamma \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 i_{21}) + \\
 &\quad + z_2 \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w \cos \varphi_1, \\
 y_1 &= x_2 (-\sin \varphi_1 \cos \varphi_1 i_{21} + \cos \gamma \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 i_{21}) + \\
 &\quad + y_2 (\sin \varphi_1 \sin \varphi_1 i_{21} + \cos \gamma \cos \varphi_1 \cos \varphi_1 i_{21}) + \\
 &\quad + z_2 \sin \gamma \cos \varphi_1 + a_w \sin \varphi_1, \\
 z_1 &= x_2 \sin \gamma \sin \varphi_1 i_{21} - y_2 \sin \gamma \cos \varphi_1 i_{21} + z_2 \cos \gamma, \\
 t_1 &= t_2 = 1
 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Формули зв'язку між нерухомою системою $S(xyz)$ і рухомою $S_2(x_2 y_2 z_2)$ можна визначити наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned}
 x_2 &= x \cos \varphi_2 + y \cos \gamma \sin \varphi_2 - z \sin \gamma \sin \varphi_2 + a_w \cos \varphi_2, \\
 y_2 &= -x \sin \varphi_2 + y \cos \gamma \cos \varphi_2 - z \sin \gamma \cos \varphi_2 - a_w \sin \varphi_2, \\
 z_2 &= y \sin \gamma + z \cos \gamma, \\
 t_2 &= t_0 = 1.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Формули переходу від рухомої системи координат $S_2(x_2 y_2 z_2)$ до нерухомої $S_0(xyz)$ визначаються так:

$$\left. \begin{aligned}
 x &= x_2 \cos \varphi_2 - y_2 \sin \varphi_2 - a_w, \\
 y &= x_2 \cos \gamma \sin \varphi_2 + y_2 \cos \gamma \cos \varphi_2 + z_2 \sin \gamma, \\
 z &= -x_2 \sin \gamma \sin \varphi_2 - y_2 \sin \gamma \cos \varphi_2 + z_2 \cos \gamma, \\
 t &= t_2 = 1.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Аналогічним чином визначимо формули переходу від S до S_1 і назад [43]:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1, \\ y &= x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1, \\ z &= z_1, \\ t &= t_1 = 1, \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x \cos \varphi_1 + y \sin \varphi_1, \\ y_1 &= -x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1, \\ z_1 &= z, \\ t_1 &= t = 1. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Рівняннями (3.6) задається зв'язок між координатами системи, що обертається, жорстко пов'язаної з виробом, що представляє собою циліндричне зубчасте колесо (система $S_1(x_1 y_1 z_1)$), і координатами системи, що обертається, жорстко пов'язаної з гіперболоїдним колесом (система $S_2(x_2 y_2 z_2)$).

Розглянемо рівняння бічної поверхні циліндричних прямозубих і косозубих коліс, що мають узагальнений вихідний профіль. Під узагальненим будемо розуміти профіль, обмежений довільною кривою виду:

$$x_1 = f_1(\lambda, P_x) - r_1; \quad y_1 = f_2(\lambda, P_y), \quad (3.12)$$

де $f_1(\lambda, P_x)$, $f_2(\lambda, P_y)$ – довільні функції, що диференціюються необхідну кількість разів;

λ – змінна величина;

r_1 – радіус кола, на якій розташовуються зубці колеса.

Тоді рівняння циліндричного прямозубого колеса з урахуванням виразів (3.12) в рухомій системі координат $S_1(x_1 y_1 z_1)$, буде мати вид:

$$x_1 = f_1(\lambda, P_x) - r_1; \quad y_1 = f_2(\lambda, P_y); \quad z_1 = \mu \quad (3.13)$$

У векторній формі рівняння циліндричного прямозубого колеса з будь-яким профілем можна записати у такий спосіб:

$$\vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N) = [f_1(\lambda, P_x) - r_1]\vec{i} + f_2(\lambda, P_y)\vec{j} + \mu\vec{k} \quad (3.14)$$

Рівняння циліндричного косозубого колеса в рухомий системі координат $x_1 y_1 z_1$ можна записати у такий спосіб

$$\begin{aligned} x_1 &= [f_1(\lambda, P_x) - r_1] \cos \mu - f_2(\lambda, P_y) \sin \mu \\ y_1 &= [f_1(\lambda, P_x) - r_1] \sin \mu + f_2(\lambda, P_y) \cos \mu, \\ z_1 &= P\mu \end{aligned}$$

де $P = T/2\pi$.

Аналогічна схема формоутворення може бути використана при обробці гіперболоїдної поверхні циліндричним обкатним різцем при подачі його уздовж осі різця (рис. 3.4).

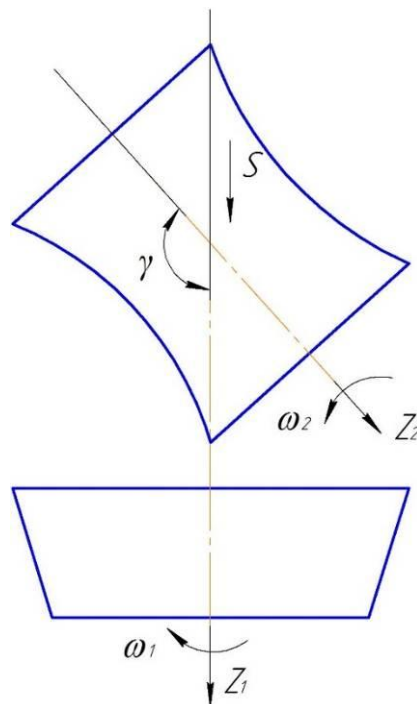


Рис. 3.4. Четвертий тип схеми формоутворення 3-го класу

Цей спосіб застосовується для виготовлення гіперболоїдних зуборізних фрез, використання яких дозволяє підвищити продуктивність і точність обробки зубчастих коліс і знизити собівартість виготовлення [56].

Використання цього типу схеми формоутворення дозволяє виготовляти недорогий високопродуктивний інструмент, який поліпшує якість механічної обробки деталей.

3.1.3. П'ятий тип кінематичних схем формоутворення 3-го класу

До різновиду кінематичних схем формоутворення третього класу можна віднести схему формоутворення при профілюванні поверхні за допомогою обертання прямої, яка утворює гіперболоїд [58], [59].

П'ятий тип кінематичної схеми формоутворення 3-го класу представлений в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

П'ятий тип кінематичної схеми формоутворення 3-го класу

Клас схеми	Тип схеми	Відносний рух виробу та інструменту при профілюванні		Подання відносного руху за допомогою аксоїдів	Ескіз взаємного розташування аксоїдів	Аксоїд	
		Складові	Сумарне миттєве			Інструмента	Виробу
3	5	Обертання гіперболоїда навколо своєї осі, поступальний уздовж прямої	Гвинтове	Кочення з ковзанням гіперболоїда по прямій		Гіперболоїд Пряма	Пряма Гіперболоїд

В цьому випадку аксоїд тіла, типу «однопорожнинний гіперболоїд» перекочується по прямій, що проходить по його твірній, з одночасним переміщенням уздовж цієї прямої. Як приклад можна розглянути точіння деталі у вигляді однопорожнинного гіперболоїда, коли різальна кромка різця переміщається по твірній гіперболоїда.

Заслугує на увагу застосування цієї схеми при нарізанні витків гіперболоїдна інструменту, здатного обробляти зубчасті колеса різного

модуля (рис. 3.5).

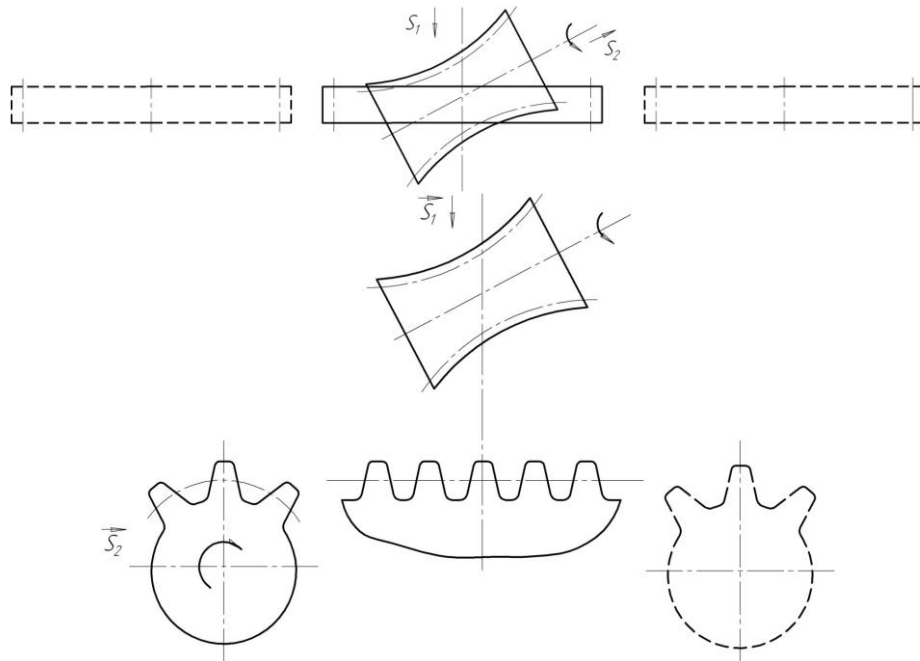


Рис. 3.5. Схема нарізування витків гіперболоїдного інструменту

Матричне подання функції формоутворення:

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{62p}(\varphi_2) \cdot M_{1pl}(a_w) \cdot M_{4lm}(\gamma) \cdot M_{3m0}(z_1) \cdot M_{601}(0) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$$

Зв'язок огинання

$$\vec{n}_1 \vec{V}_1^{(12)} = 0.$$

Функціональний зв'язок

$$V_1 = z_1 / t, \text{ де } z_1 = \varphi_2 \cdot a_w \cdot \cos \gamma.$$

Тут переміщення здійснюється уздовж прямолінійної формоутворюючої однопорожнинного гіперболоїда.

3.1.4. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс і інструментів

Використовуючи ідею п'ятого типу кінематичної схеми формоутворення 3-го класу, оформлений і отриманий патент № 68546 [205] (рис. 3.6).

В основі винаходу лежить задача удосконалення способу нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс таким чином, щоб отримати таку геометрію зубчастого колеса гіперболоїдної передачі, яка дозволяє гіперболоїдному колесу входити в зачеплення з циліндричним колесом будь-якого діаметру з різною кількістю зубців. У способі нарізання гіперболоїдних зубчастих коліс для гіперболоїдної передачі завдання вирішується так, що коли осі заготовки та інструменту схрещені, а кутові швидкості обернено пропорційні кількості їх зубців, нарізування виконують прямозубим довбачем на заготовці, виконаній у вигляді однопорожнинного гіперболоїда, подачею довбача уздовж прямолінійної формоутворюючої однопорожнинного гіперболоїда. Це дозволяє отримувати рух, аналогічний руху зубчастої рейки, тобто отримувати обкочування гіперболоїдного колеса довбачем нескінченно великого діаметру, що дозволяє отримувати гіперболоїдні колеса з принципово новою геометрією зуба. Суть показана на рис. 3.6, де зображено пристрій для реалізації запропонованого способу, який містить прямозубий довбач 1, гіперболоїдне колесо 2. Спосіб реалізується таким чином. На столі зубофрезерного верстата на оправці встановлюють прямозубий довбач 1. На інструментальному супорті верстата встановлюють заготовку для нарізання гіперболоїдного колеса 2. Вісь інструментального супорта повернута на кут γ по відношенню до осі столу верстата. Стіл верстата та інструментальний супорт обертаються з кутовими швидкостями обертання, пропорційними кількості зубців довбача 1 і нарізуваного гіперболоїдного зубчастого колеса 2. Довбач переміщують з подачею S вздовж прямолінійних формоутворюючих однопорожнинного гіперболоїда. Переваги технічного рішення полягають у тому, що: можна отримати гіперболоїдні зубчасті

колеса з принципово новою геометрією зуба; підвищується продуктивність виготовлення зубчастих коліс; підвищується якість виготовлення гіперболоїдних коліс; з'являється можливість зчеплення одного гіперболоїдного колеса з різними циліндричними зубчастими колесами.

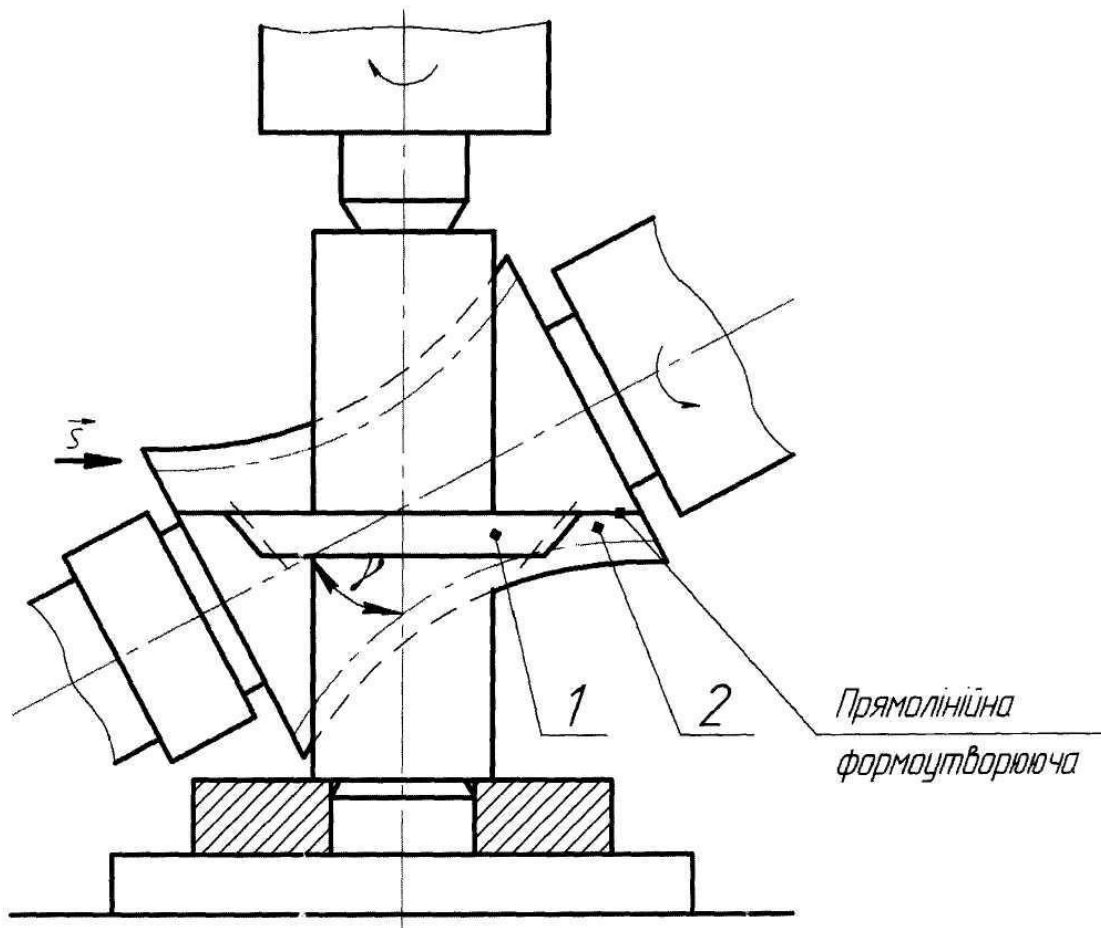


Рис. 3.6. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс і інструментів

3.2. Зв'язки огинання

Кінематичну схему формоутворення 4-го типу 3-го класу можна проаналізувати на прикладі пари «гіперболоїд-циліндр». Поверхня гіперболоїдного колеса знаходиться в зачепленні з огинаючою її поверхнею циліндричного колеса, жорстко пов'язаної з системою координат, що обертається $x_1y_1z_1$.

Зазначені поверхні мають контакт за характеристиками. Це доводиться наступними міркуваннями. Нехай задано сімейство поверхонь, залежне від

кута повороту φ , яке визначається наступним виразом: $F(x, y, z, \varphi) = 0$. Змінюючи φ , отримуємо різні поверхні сімейства. Візьмемо дві сусідні поверхні сімейства $F(x, y, z, \varphi) = 0$ і $F(x, y, z, \varphi + \Delta\varphi) = 0$. Припустимо, що ці дві сусідні поверхні будуть перетинатися. Тоді лінія перетину цих поверхонь запишеться наступною системою рівнянь [43]:

$$F(x, y, z, \varphi) = 0; F(x, y, z, \varphi + \Delta\varphi) = 0$$

Граничне положення зазначеної лінії перетину при $\Delta\varphi \rightarrow 0$ називається характеристикою поверхні (контактної лінією). Рівняння характеристики будуть наступними:

$$F(x, y, z, \varphi) = 0; \partial F(x, y, z, \varphi) / \partial \varphi = 0 \quad (3.15)$$

Змінюючи кут повороту системи координат отримаємо деяке місце характеристик, яке називається *дискримінантною поверхнею*.

Виключивши кут повороту з системи рівнянь (3.15), отримаємо рівняння дискримінантної поверхні. Якщо дискримінантна поверхня торкається поверхні сімейства, то вона називається *огиноючою*. Огиноюча поверхня дотикається кожної поверхні сімейства уздовж характеристик.

Суть методу утворення сполучених поверхонь (зуба циліндричного колеса зубом гіперболоїдна колеса) полягає в наступному. Візьмемо бічну поверхню зуба Π_1 , жорстко пов'язану з колесом K_1 , і знайдемо її огиноючу Γ_2 (гіперболоїд) у відносному русі колеса K_1 по відношенню до колеса K_2 , жорстко зв'язаному з Γ_2 . Ця огиноюча поверхня Γ_2 й буде шуканою поверхнею, спряженою з огиноючою поверхнею Π_1 , так як взаємно огиноючі поверхні мають властивість спряжених поверхонь.

З причини того, що огиноюча Γ_2 поверхні Π_1 , жорстко пов'язаної з колесом K_1 , є геометричним місцем характеристик, що лежать на поверхні Π_1

в її відносному русі відносно поверхні Γ_2 , вона буде лежати одночасно на поверхнях Γ_2 і Π_1 ; відповідно, поверхні Γ_2 і Π_1 будуть дотикатись по характеристикам, тобто будуть мати лінійний контакт [43].

Визначимо лінії контакту і огинаючу поверхню. Для визначення названих геометричних параметрів в теорії зубчастих зачеплень існує кілька методів [43]:

1) Метод диференціальної геометрії, розроблений видатними математиками і механіками. Необхідно відзначити, що метод складний для вирішення конкретних завдань з геометрії і кінематики зачеплень.

2) Метод Х.І. Гохмана [110] є основою аналітичної теорії просторових зачеплень. Запропонований Х.І. Гохманом метод спростив визначення огинаючої поверхні і ліній контакту поверхонь, що взаємно огинаються..

Застосування методу Х.І. Гохмана, як підкреслено вище, спростило розрахунок зачеплень в порівнянні зі звичайним методом диференціальної геометрії. Проте, сам шлях розрахунку залишався складним, що спонукало ряд дослідників зайнятися пошуками спрощень методу досліджень зачеплень.

При вирішенні основних завдань теорії зачеплень дослідники виходили з наступної теорії просторових зачеплень: в точці M торкання бічних поверхонь зубців вектор швидкості відносного руху повинен лежати в площині, дотичній до дотичних поверхонь. Така умова пов'язаності впливає з того, що у відносному русі коліс поверхні зубців, як взаємно огинаючи поверхні, можуть лише перекочуватися і ковзати один по одному, і вектор швидкості відносного руху лежить в дотичній площині до поверхонь. Рівняння по Гохману

$$\begin{aligned} F(x_1 y_1 z_1) &= 0, \\ \partial F_1 / \partial \varphi_1 [x_1(x_2, y_2, z_2, u_{12}), y_1(x_2, y_2, z_2, u_{12}), \\ z_1(x_2, y_2, z_2, u_{12})] &= 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

визначають лінії контакту, що виражають умови пов'язаності шуканих зубців. Дійсно, частинні похідні $\partial x_1 / \partial \varphi_1$, $\partial y_1 / \partial \varphi_1$ та $\partial z_1 / \partial \varphi_1$ знаходимо диференціюванням по φ_1 залежностей (3.7), які виражають $x_1 y_1 z_1$ як функції від x_2, y_2, z_2 , враховуючи при цьому, що $\partial \varphi_1 / \partial \varphi_2 = u_{12}$. Очевидно, що вектор $d\vec{S}_1$ елементарного переміщення у відносному русі визначиться таким виразом [43]:

$$d\vec{S}_1 = \partial x_1 / \partial \varphi_1 d\varphi_1 \vec{i} + \partial y_1 / \partial \varphi_1 d\varphi_1 \vec{j} + \partial z_1 / \partial \varphi_1 d\varphi_1 \vec{k}_1, \quad (3.17)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}_1$ – орти координатних осей.

Вирази $\partial \vec{F}_1 / \partial x_1$, $\partial \vec{F}_1 / \partial y_1$, $\partial \vec{F}_1 / \partial z_1$ пропорційні напрямним косинусам нормалі до поверхні. Контактну лінію по Гохману можна записати в такому виді:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x_1 y_1 z_1) &= 0, \\ \partial F_1 / \partial x_1 \cdot \partial x_1 / \partial \varphi_1 + \partial F_1 / \partial y_1 \cdot \partial y_1 / \partial \varphi_1 + \partial F_1 / \partial z_1 \cdot \partial z_1 / \partial \varphi_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Тоді друге рівняння в (3.18) є не що інше, як скалярний добуток $\vec{n}_1 \cdot d\vec{S}_1 = 0$ в проекціях на прямокутні осі координат. Рівняння $\vec{n}_1 \cdot d\vec{S}_1 = 0$ висловлює умову перпендикулярності векторів нормалі і елементарного переміщення $d\vec{S}_1$, зводиться до вимоги, що в точці M торкання поверхонь зубців вектор швидкості відносного переміщення повинен лежати в площині, дотичній до поверхонь в точці M .

При безпосередньому використанні основної теореми просторових зачеплень для визначення контактної лінії на поверхні зубців циліндричного колеса I слід взяти рівняння [43]:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_1(\lambda, \mu), \quad \vec{n}_1 \cdot \vec{V}^{(12)} = 0 \quad (3.19)$$

Перше з цих рівнянь виражає поверхню зубців у вигляді вектор-функції двох скалярних параметрів; друге рівняння, в якому \vec{n}_1 – вектор нормалі, $\vec{V}^{(12)}$ – вектор швидкості відносного руху, висловлює сформульовану вище умову пов'язаності бічних поверхонь зубців. У координатному записі рівняння контактної лінії будуть виглядати так:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), \quad y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), \quad z_1 = z_1(\lambda, \mu, P, N), \\ n_{x1}V_{x1}^{(12)} + n_{y1}V_{y1}^{(12)} + n_{z1}V_{z1}^{(12)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Вирази n_{x1}, n_{y1}, n_{z1} проекцій нормалі визначаються з рівнянь [43]:

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \partial y / \partial \lambda \cdot \partial z / \partial \mu - \partial y / \partial \mu \cdot \partial z / \partial \lambda, \\ n_y &= \partial z / \partial \lambda \cdot \partial x / \partial \mu - \partial z / \partial \mu \cdot \partial x / \partial \lambda, \\ n_z &= \partial x / \partial \lambda \cdot \partial y / \partial \mu - \partial x / \partial \mu \cdot \partial y / \partial \lambda \end{aligned} \right\},$$

і залежать лише від виду заданої поверхні зубців. Вектор відносної швидкості $\vec{V}^{(12)}$ визначається розташуванням осей обертання колеса та передавальним числом і від виду бічної поверхні не залежить.

По методу Гохмана для визначення виразів $\partial x_1 / \partial \varphi_1, \partial y_1 / \partial \varphi_1$ та $\partial z_1 / \partial \varphi_1$, еквівалентних проекціям вектору елементарного переміщення необхідно скористатися досить складною процедурою: 1) Використовуючи формули зв'язку між системами координат спочатку знаходимо функції [43]:

$$x_1 = x_1(x_2, y_2, z_2, \varphi_1, u_{12});$$

$$y_1 = y_1(x_2, y_2, z_2, \varphi_1, u_{12});$$

$$z_1 = z_1(x_2, y_2, z_2, \varphi_1, u_{12}).$$

Потім знаходимо вираження частинних похідних цих функцій $\partial x_1 / \partial \varphi_1, \partial y_1 / \partial \varphi_1, \partial z_1 / \partial \varphi_1$, котрі містять координати x_2, y_2, z_2 . Для заміни x_2, y_2, z_2 на x_1, y_1, z_1 слід скористатись функціями:

$$x_2 = x_2(x_1, y_1, z_1, \varphi_1, u_{12}),$$

$$y_2 = y_2(x_1, y_1, z_1, \varphi_1, u_{12}),$$

$$z_2 = z_2(x_1, y_1, z_1, \varphi_1, u_{12}).$$

Всі ці дії необхідні для визначення проекцій вектору елементарного переміщення. У зв'язку з цим виникає таке питання: чи не можна для визначення вектору відносної швидкості скористатися методами, використовуваними в кінематиці? Позитивна відповідь на це питання була дана Шишковим В.А. [259], Давидовим Я.С. [122] та Литвиним Ф.Л. [179].

Запишемо, базуючись на кінематичному методі $\vec{n} \cdot \vec{V}_1^{(12)} = 0$, в більш докладному виді рівняння (3.18) контактної лінії на бічній поверхні зубців циліндричного колеса I , якщо зубчастим зачепленням передається обертання між перехресними валами. Проекції вектору $\vec{V}_1^{(12)}$ швидкості відносного руху в системі координат $x_1 y_1 z_1$ при $\omega_1 = 1$ рад/с виражені рівняннями [43]:

$$\left. \begin{aligned} V_{x1}^{(12)} &= (x \sin \varphi_1 - y \cos \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) - \\ &\quad - z_1 u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1, \\ V_{y1}^{(12)} &= (x \cos \varphi_1 + y \sin \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) + \\ &\quad + z_1 u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1, \\ V_{z1}^{(12)} &= u_{21} \sin \gamma (x + a_w). \end{aligned} \right\}.$$

Використовуючи ці вирази, рівняння (3.20) контактної лінії запишемо так:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), z_1 = z_1(\lambda, \mu, P, N), \\ n_{x1}[-u_{21}z_1 \sin \gamma \cos \varphi_1 - y_1(1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1] + \\ n_{y1}[x_1(1 - u_{21} \cos \gamma) + u_{21}z_1 \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1] + \\ + n_{z1}[(x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w)u_{21} \sin \gamma] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Вміщені в цих рівняннях параметри n_{x1}, n_{y1}, n_{z1} визначаються так [43]:

$$\begin{aligned} n_{x1} &= \partial y_1 / \partial \lambda \cdot \partial z_1 / \partial \mu \cdot \partial z_1 / \partial \lambda, \\ n_{y1} &= \partial z_1 / \partial \lambda \cdot \partial x_1 / \partial \mu - \partial z_1 / \partial \mu \cdot \partial x_1 / \partial \lambda, \\ n_{z1} &= \partial x_1 / \partial \lambda \cdot \partial y_1 / \partial \mu - \partial x_1 / \partial \mu \cdot \partial y_1 / \partial \lambda \end{aligned}$$

а рівняння (3.21) після перетворень можна привести до залежності:

$$F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0$$

Рівняння контактної лінії в рухомій системі координат $S_1(x_1 y_1 z_1)$ запишемо тепер так:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), \quad y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), \\ z_1 &= z_1(\lambda, \mu, P, N), \quad F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Визначимо рівняння поверхні зачеплення. Для цієї мети запишемо рівняння (3.22) контактної лінії в нерухомій системі координат $S(xyz)$, скориставшись формулами переходу (3.10). У векторній формі запису це виглядатиме так:

$$F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0, \quad \vec{r}_1 = \vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N), \quad r = M_{01} r_1 \quad (3.23)$$

У прямокутних координатах рівняння поверхні зачеплення визначаються наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), \quad y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), \quad z_1 = z_1(\lambda, \mu, P, N), \quad F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \\ x &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1, \quad y = x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1, \quad z = z_1. \end{aligned} \right\} (3.24)$$

Рівняння (3.24) виражають поверхню зачеплення, як геометричне місце контактних ліній в нерухомій системі координат. Для визначення перетину поверхні зачеплення якою-небудь площиною, наприклад $y = \text{const}$, знайдемо, виходячи з виразів для y_1 , x_1 , рівняння

$$F_2(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0. \quad (3.25)$$

Розглядаючи спільно рівняння $F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0$ та $F_2(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0$, можна виключити один параметр, наприклад φ_1 , і знайти зв'язок між параметрами λ та μ . Далі, задаючись одним з параметрів поверхні, наприклад μ , визначимо другий параметр λ , а потім, використовуючи систему (3.24), розрахуємо координати x і z . Аналогічно знаходяться перетини поверхні зачеплення площинами $z = \text{const}$, $x = \text{const}$.

Визначимо тепер рівняння бічної поверхні зубців гіперболоїдного колеса 2. У векторній формі ці рівняння виглядають так:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N), \quad r_2 = M_{21} r_{12} \quad F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0 \quad (3.26)$$

У прямокутних координатах рівняння поверхні зубців гіперболоїдного колеса 2 з урахуванням виразів (3.6) і $\vec{r} = x(\lambda, \mu)\vec{i} + y(\lambda, \mu)\vec{j} + z(\lambda, \mu)\vec{k}$, приймуть вид [31]:

$$\left. \begin{aligned}
 F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0 \quad x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), \quad y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), \quad z_1 = z_1(\lambda, \mu, P, N), \\
 x_2 &= [x_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \varphi_1 - y_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \varphi_1 + a_w] \cos \varphi_2 + \\
 &\quad + [x_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \varphi_1 \cos \gamma + y_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \varphi_1 \cos \gamma - z_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \gamma] \sin \varphi_2 \\
 y_2 &= -[x_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \varphi_1 - y_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \varphi_1 + a_w] \sin \varphi_2 + \\
 &\quad + [x_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \varphi_1 \cos \gamma + y_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \varphi_1 \cos \gamma - z_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \gamma] \cos \varphi_2, \\
 z_2 &= [x_1(\lambda, \mu, P, N) \sin \varphi_1 + y_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \varphi_1] \sin \gamma + z_1(\lambda, \mu, P, N) \cos \gamma
 \end{aligned} \right\} (3.27)$$

Ці рівняння виражають геометричне місце контактних ліній в системі координат, пов'язаної з гіперболоїдним колесом 2. Для перетину поверхні зубців який-небудь площиною, наприклад $y_2 = \text{const}$, необхідно знайти, використовуючи вирази y_2 , зв'язок між параметрами λ, μ, φ_1 у виді:

$$F_2(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0.$$

Систему рівнянь

$$F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0, \quad F_2(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0 \quad (3.28)$$

можна звести до одного рівняння зв'язку між параметрами λ та μ . Далі, задаючись одним з параметрів, наприклад λ , знаходимо другий параметр μ , а далі, використовуючи систему (3.27), обчислюємо координати перетину поверхні зубців гіперболоїдного колеса.

Зауважимо, що розрахунок зачеплення циліндричного зубчастого колеса 1 з гіперболоїдним колесом 2 доцільно починати з визначення контактної лінії в нерухомій системі координат $S(x, y, z)$, а не в системі координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, як це викладено вище. Контактна лінія визначиться при цьому виразом [43]:

$$\vec{r} = M_{01} \vec{r}_1; \quad \vec{n} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.29)$$

де \vec{n} – вектор нормалі;

$\vec{V}^{(12)}$ – вектор швидкості відносного руху в нерухомій системі координат $S(x y z)$.

У прямокутних координатах контактна лінія визначається рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1(\lambda, \mu, P, N), \quad y_1 = y_1(\lambda, \mu, P, N), \quad z_1 = z_1(\lambda, \mu, P, N), \\ x &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1, \quad y = x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1, \quad z = z_1, \\ n_x V_x^{(12)} + n_y V_y^{(12)} + n_z V_z^{(12)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Проекції швидкості $\vec{V}^{(12)}$ представлені рівняннями [43]:

$$\left. \begin{aligned} V_x^{(12)} &= -(x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) - z u_{21} \sin \gamma, \\ V_y^{(12)} &= (x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma, \\ V_z^{(12)} &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + a_w u_{21} \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

Для того, щоб отримати істинні значення проекцій швидкості відносного руху, праві частини рівнянь (3.31) необхідно помножити на величину $\omega^{(1)}$ кутової швидкості обертання циліндричного зубчастого колеса I .

Далі нам знадобляться вираження проекцій швидкості відносного руху $\vec{V}_1^{(12)}$ в рухомій системі $S_1(x_1 y_1 z_1)$, жорстко пов'язаної з циліндричним зубчастим колесом I . Скористаємося для цього матричною рівністю [178]:

$$V_1^{(12)} = L_{10} V^{(12)}, \quad (3.32)$$

де матриця

$$L_{10} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.33)$$

Використовуючи вирази (3.32), (3.33), (3.31), отримаємо [178]:

$$\left. \begin{aligned} V_{x1}^{(12)} &= (x \sin \varphi_1 - y \cos \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) - \\ &\quad - z_1 u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1, \\ V_{y1}^{(12)} &= (x \cos \varphi_1 + y \sin \varphi_1) \cdot (1 - u_{21} \cos \gamma) + \\ &\quad + z_1 u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1, \\ V_{z1}^{(12)} &= u_{21} \sin \gamma (x + a_w). \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Зв'язок між проекціями векторів нормалі в системах координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$ и $S(x, y, z)$ визначається рівнянням $n = L_{01} n_1$, тоді

$$\left. \begin{aligned} n_x &= n_{x1} \cos \varphi_1 - n_{y1} \sin \varphi_1, \\ n_y &= n_{x1} \sin \varphi_1 + n_{y1} \cos \varphi_1, \\ n_z &= n_{z1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

З урахуванням наведених вище виразів рівняння контактної лінії запишемо так:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \quad y = y(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \quad z = z(\lambda, \mu, P, N), \\ n_x [-y(1 - u_{21} \cos \gamma) - z u_{21} \sin \gamma] &+ n_y [x(1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma] + \\ &+ n_z [(x + a_w) u_{21} \sin \gamma] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

Систему (3.36) можна звести до залежності між параметрами λ , μ и φ_1 таким виразом $F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0$.

Після цього для визначення поверхні зачеплення потрібно

скористатися такими рівняннями:

$$\begin{aligned} F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) &= 0 \quad x = x(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \\ y &= y(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \quad z = z(\lambda, \mu, P, N) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Для визначення зубців 2 можна скористатися рівняннями:

$$F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0, \quad \vec{r}_2 = M_{21} \vec{r}_1. \quad (3.38)$$

Матриця M_{21} була представлена раніше рівняннями (3.6). Для визначення контактної лінії на поверхні зубців 1 можна скористатися рівняннями:

$$F_1(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) = 0, \quad \vec{r}_1 = \vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N). \quad (3.39)$$

3.3. Побудова функціональної поверхні

Рівняння сімейства поверхонь, що огинають (в нашому випадку гіперболоїдне колесо) поверхню циліндричного колеса можуть бути знайдені шляхом підстановки координат точок поверхні циліндричного колеса, вираженого рівняннями (3.13) в рівняння (3.6). Після підстановки отримуємо [213]:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1)(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + f_2(\lambda, P_y) \times \\ &\times (\cos \gamma \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma \sin \varphi_2 + a_w \cos \varphi_2 \\ y_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1)(\cos \gamma \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cos \varphi_1) + f_2(\lambda, P_y) \times \\ &\times (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma \cos \varphi_2 - a_w \sin \varphi_2 \\ z_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1) \sin \gamma \sin \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \sin \gamma \cos \varphi_1 + \mu \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Для визначення шуканої гіперболоїдної поверхні до системи (3.40) необхідно приписати рівняння зв'язку $\vec{n} \cdot \vec{V}^{(12)} = 0$, де \vec{n} – вектор нормалі до поверхні зуба циліндричного колеса, вираженого рівнянням (3.40).

Використовуючи ці рівності, отримаємо вектори дотичних до ліній $\lambda = \text{const}$, $\mu = \text{const}$

$$\vec{r}_1^\lambda = f_1'(\lambda, P_x)\vec{i} + f_2'(\lambda, P_y)\vec{j}, \quad \vec{r}_1^\mu = \vec{k} \quad (3.41)$$

Підставляючи отримані часткові похідні у вирази $\vec{n} = \partial\vec{r}/\partial\lambda \times \partial\vec{r}/\partial\mu$ та

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \partial y / \partial \lambda \cdot \partial z / \partial \mu - \partial y / \partial \mu \cdot \partial z / \partial \lambda, \\ n_y &= \partial z / \partial \lambda \cdot \partial x / \partial \mu - \partial z / \partial \mu \cdot \partial x / \partial \lambda, \\ n_z &= \partial x / \partial \lambda \cdot \partial y / \partial \mu - \partial x / \partial \mu \cdot \partial y / \partial \lambda \end{aligned} \right\},$$

отримаємо проекції одиничного вектору нормалі до поверхні (3.14) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} n_{x1} &= \frac{f_2'(\lambda, P_y)}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}, \\ n_{y1} &= \frac{-f_1'(\lambda, P_x)}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}, \\ n_{z1} &= 0. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Для визначення нормальних кривизн, головних напрямків і інших характеристик циліндричної поверхні (3.14) необхідно мати вирази для коефіцієнтів першої і другої квадратичної форм. У загальному випадку коефіцієнти першої квадратичної форми поверхні рівні [97], [220], [227]:

$$E_1 = (\vec{r}_1^\lambda)^2; \quad F_1 = \vec{r}_1^\lambda \vec{r}_1^\mu; \quad G_1 = (\vec{r}_1^\mu)^2 \quad (3.43)$$

Коефіцієнти другої квадратичної форми визначають таким чином [99]:

$$L_1 = \vec{n}_1 \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda^2; \quad M_1 = \vec{n}_1 \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda \partial \mu; \quad N_1 = \vec{n}_1 \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \mu^2 \quad (3.44)$$

де \vec{n}_1 – одиничний вектор до нормалі поверхні.

Визначимо коефіцієнти (3.43) і (3.44) для циліндричної поверхні (3.14). Для поверхні (3.14) перші похідні вектор-функції $\vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$ мають вид (3.41).

Другі похідні для поверхні (3.14) мають такий вигляд:

$$\partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda^2 = f_1''(\lambda, P_x) \vec{i}_1 + f_2''(\lambda, P_y) \vec{j}; \quad \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \lambda \partial \mu = 0; \quad \partial^2 \vec{r}_1 / \partial \mu^2 = \vec{r}_1''(\mu) = 0 \quad (3.45)$$

Проекції одиничного вектора нормалі до циліндричної поверхні (3.14) визначається виразами (3.42).

Підставляючи в (3.43) значення похідних (3.41) отримуємо

$$E_1 = (f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2; \quad F_1 = 0; \quad G_1 = 0. \quad (3.46)$$

Підставляючи в (3.44) значення других похідних (3.45) і проекцій нормалі (3.42) отримуємо:

$$L_1 = \frac{(f_1''(\lambda, P_x) f_2'(\lambda, P_y) - f_1'(\lambda, P_x) f_2''(\lambda, P_y))}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}} \quad (3.47)$$

$$M_1 = 0; \quad N_1 = 0.$$

Маючи коефіцієнти першої та другої квадратичних форм, визначимо нормальні кривизни ліній, що лежать на циліндричній поверхні. Для цього можна застосувати метод, застосовуваний у диференціальній геометрії [97]:

$$K = L_1 d\lambda^2 / (E_1 d\lambda^2 + G d\mu^2) \quad (3.48)$$

Напрямки, в якому визначаються кривизни зуба циліндричного колеса, залежать від відношення $d\lambda/d\mu$. Так, нормальні кривизни уздовж ліній $\mu=const$ та $\lambda=const$, які є в даному випадку головними, дорівнюватимуть:

$$K_\mu = L_1 / E_1 = \frac{f_1'(\lambda, P_x) f_2''(\lambda, P_y) - f_1''(\lambda, P_x) f_2'(\lambda, P_y)}{[(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2]^{3/2}}; \quad (3.49)$$

$$K_\lambda = N_1 / G_1$$

З урахуванням рівнянь (3.13) відносна швидкість $\vec{V}^{(12)}$

$$\left. \begin{aligned} V_{x1}^{(12)} &= [f_1(\lambda, P_x) \sin \varphi_1 - r_1 \sin \varphi_1 - f_2(\lambda, P_y) \cos \varphi_1] [1 - u_{21} \cos \gamma] - \\ &\quad - \mu u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1, \\ V_{y1}^{(12)} &= [f_1(\lambda, P_x) \cos \varphi_1 - r_1 \cos \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \sin \varphi_1] (1 - u_{21} \cos \gamma) + \\ &\quad + \mu u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1, \\ V_{z1}^{(12)} &= u_{21} \sin \gamma [(f_1(\lambda, P_x) - r_1) + a_w] \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

Тоді рівняння зв'язку між параметрами λ, μ, φ_1 з урахуванням виразів (3.42) і (3.50) можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} F(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1) &= \vec{n}_1 \vec{V}_1^{(12)} = n_{x1} V_{x1}^{(12)} + n_{y1} V_{y1}^{(12)} + n_{z1} V_{z1}^{(12)} = \\ &= -(1 - u_{21} \cos \gamma) (f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y) + f_1'(\lambda, P_x) f_1(\lambda, P_x) - r_1) - \\ &\quad - \mu u_{21} \sin \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1) - \\ &\quad - a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 - f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_1) \end{aligned} \quad (3.51)$$

Якщо отриманий вираз (3.51) приписати до системи рівнянь (3.40), що представляють сімейство поверхонь, то отримаємо шукане основне гіперболоїдне колесо.

Рівняння верстатного зачеплення косозубого циліндричного колеса з гіперболоїдним можна представити в наступному вигляді

$$\begin{aligned}
 F(\lambda, z_1, P, N, \varphi_1) = & P^2 z_1 [f_1'(\lambda, P_x) \sin(z_1 + \varphi_1) + f_2'(\lambda, P_y) \cos(z_1 + \varphi_1)] + \\
 & + Pa_w [f_2'(\lambda, P_y) \sin(z_1 + \varphi_1) - f_1'(\lambda, P_x) \cos(z_1 + \varphi_1)] \operatorname{ctg} \gamma - \\
 & - [(f_1(\lambda, P_x) - r_1) \cos(z_1 + \varphi_1) - f_2(\lambda, P_y) \sin(z_1 + \varphi_1) + \\
 & + a_w P (1 - u_{21} \cos \gamma / u_{21} \sin \gamma) \cdot [f_1'(\lambda, P_x) (f_1(\lambda, P_x) - r_1) + f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y)]
 \end{aligned} \quad (3.52)$$

Таким чином, теоретично отримано просторове зачеплення поверхонь зубців гіперболоїдного колеса з циліндричним колесом.

Рівняння (3.51) дозволяє визначити один із змінних параметрів. Так, вирішуючи його відносно параметра, маємо [142]:

$$\begin{aligned}
 \mu = & -a_w u_{21} \cos \gamma [f_2'(\lambda) \sin \varphi_1 - f_1'(\lambda) \cos \varphi_1] + (1 - u_{21} \cos \gamma) [f_2(\lambda) f_2'(\lambda) + \\
 & + f_1'(\lambda) (-r_1 + f_1(\lambda))] / [u_{21} \sin \gamma (f_2'(\lambda) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda) \sin \varphi_1)]
 \end{aligned} \quad (3.53)$$

Рівняння поверхні зачеплення легко отримати, записавши координати поверхні зуба циліндричного колеса (3.13) в нерухомій системі координат і використовуючи значення параметра μ з рівняння (3.53). Застосовуючи формули (3.2) переходу від рухомої системи координат $S_1(x_1 y_1 z_1)$ до нерухомої системи координат $S(x y z)$, отримаємо рівняння поверхні зачеплення в наступному вигляді:

а) для прямозубого колеса

$$\begin{aligned}
 x = & f_1 \cos \varphi_1 - r_1 \cos \varphi_1 - f_2 \sin \varphi_1; \\
 y = & f_1 \sin \varphi_1 - r_1 \sin \varphi_1 + f_2 \cos \varphi_1; \\
 z = & -a_w u_{21} \cos \gamma (f_2' \sin \varphi_1 - f_1' \cos \varphi_1) + (1 - u_{21} \cos \gamma) (f_2 f_2' + \\
 & + f_1' f_1 - r_1 f_1') / [u_{21} \sin \gamma (f_2' \cos \varphi_1 + f_1' \sin \varphi_1)]
 \end{aligned} \quad (3.54)$$

б) для косозубого колеса

$$x = f_1 \cos(\mu + \varphi_1) - f_2 \sin(\mu + \varphi_1)$$

$$y = f_1 \sin(\mu + \varphi_1) + f_2 \cos(\mu + \varphi_1)$$

$$F(\theta, \mu, \varphi_1) = P^2 \mu [f_1' \sin(\mu + \varphi_1) + f_2' \cos(\mu + \varphi_1)] + P a_w [f_2' \sin(\mu + \varphi_1) - (3.55) \\ - f_1' \cos(\mu + \varphi_1)] \operatorname{ctg} \gamma - [f_1 \cos(\mu + \varphi_1) - f_2 \sin(\mu + \varphi_1) + a_w - \\ - P(1 - u_{21} \cos \gamma)] / u_{21} \sin \gamma (f_1' f_1 + f_2' f_2)$$

При фіксованому значенні рівняння (3.54) і (3.55) визначаємо лінії контакту зачеплення циліндричного колеса з квазігіперболоїдним колесом в нерухомій системі координат.

Розроблений для просторових зачеплень алгоритм, заснований на теорії сплайнів та теорії формоутворення, дозволяє вибрати раціональну криву, яка описує контур поверхні твірного колеса і автоматично передати її в одну з CAD систем [50].

На рис. 3.7 приведена крива, розбита на сто ділянок, кожна з яких представляє сплайн. Розроблена теорія дозволяє розглядати кожен ділянку окремо, але вимоги до точності геометрії коліс дозволяють спростити задачу синтезу, апроксимувати всю ділянку кривої одним сплайном (рис. 3.8).

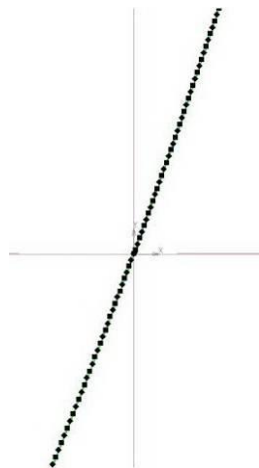


Рис. 3.7. Точки контуру

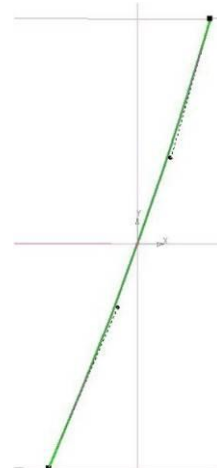


Рис. 3.8. Апроксимація сплайном

Причому, математичний опис допоміжних кривих, які округлюють

вихідний контур біля ножки і на голівці зуба (рис. 3.9,б) має такий самий опис у вигляді кривої Безьє 3-го порядку. На рис. 3.9а,б показані розміри, що визначають відстань від осей системи координат до керуючих і опорних точок сплайнів кривих, що описують вихідний контур поверхні твірного колеса.

Для зручності розміри збільшені в 10 разів. Координати цих точок є вихідною інформацією для побудови поверхонь зубців просторового зачеплення.

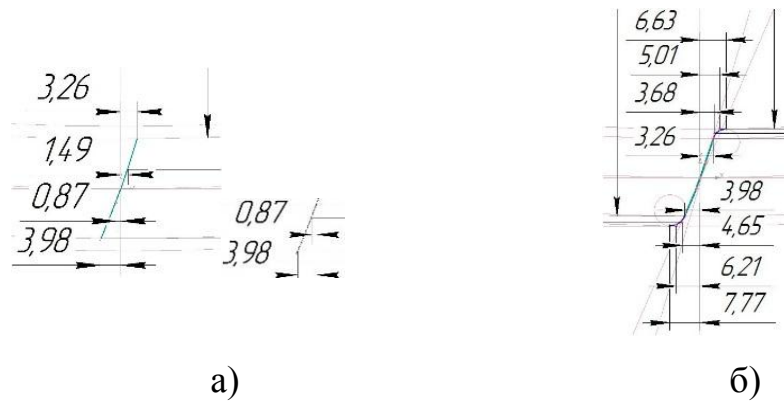


Рис. 3.9. Координати опорних і керуючих точок сплайна:

а – вихідний контур; б – вихідний контур з допоміжними ділянками

При виборі раціональної геометрії зубців просторового зачеплення велике значення мають параметри, що визначають кут схрещування між осями і число заходів гіперболоїдного колеса, що впливають на передавальне відношення. Всі ці параметри були враховані при отриманні математичних залежностей і розробці алгоритму визначення контактних ліній. На рис.3.10 показано, як за допомогою розробленого програмного забезпечення «SCOT» [237] визначені точки контакту поверхонь зубців просторового зачеплення.

Результаты расчета								
Xk = -48.999	Yk = 0.326	Zk = -2.978	Xg = 21.501	Yg = 2.441	Zg = 1.736	Xo = -48.999	Yo = 0.326	Zo = -2.978
Xk = -49.186	Yk = 0.271	Zk = -2.316	Xg = 21.314	Yg = 1.89	Zg = 1.365	Xo = -49.186	Yo = 0.271	Zo = -2.316
Xk = -49.375	Yk = 0.213	Zk = -1.7	Xg = 21.125	Yg = 1.381	Zg = 1.014	Xo = -49.375	Yo = 0.213	Zo = -1.7
Xk = -49.568	Yk = 0.15	Zk = -1.125	Xg = 20.932	Yg = 0.909	Zg = 0.68	Xo = -49.568	Yo = 0.15	Zo = -1.125
Xk = -49.763	Yk = 0.084	Zk = -0.585	Xg = 20.737	Yg = 0.469	Zg = 0.359	Xo = -49.763	Yo = 0.084	Zo = -0.585
Xk = -49.962	Yk = 0.014	Zk = -0.074	Xg = 20.538	Yg = 0.058	Zg = 0.049	Xo = -49.962	Yo = 0.014	Zo = -0.074
Xk = -50.163	Yk = -0.06	Zk = 0.41	Xg = 20.337	Yg = -0.329	Zg = -0.252	Xo = -50.163	Yo = -0.06	Zo = 0.41
Xk = -50.367	Yk = -0.138	Zk = 0.871	Xg = 20.133	Yg = -0.693	Zg = -0.545	Xo = -50.367	Yo = -0.138	Zo = 0.871
Xk = -50.575	Yk = -0.22	Zk = 1.312	Xg = 19.925	Yg = -1.038	Zg = -0.832	Xo = -50.575	Yo = -0.22	Zo = 1.312
Xk = -50.785	Yk = -0.307	Zk = 1.736	Xg = 19.715	Yg = -1.366	Zg = -1.114	Xo = -50.785	Yo = -0.307	Zo = 1.736
Xk = -50.999	Yk = -0.398	Zk = 2.144	Xg = 19.501	Yg = -1.678	Zg = -1.393	Xo = -50.999	Yo = -0.398	Zo = 2.144

Рис. 3.10. Приклад розрахунку координат контактних точок

Координати контактних точок автоматично зберігаються в текстовому файлі (рис. 3.11).

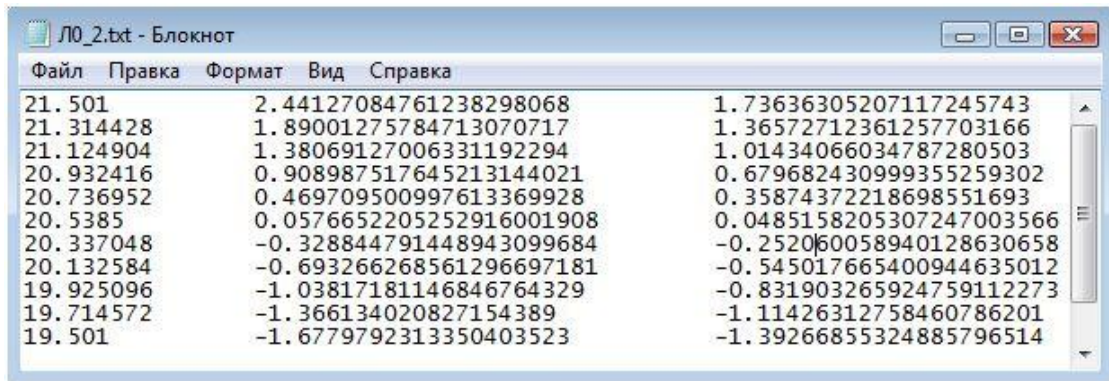



Рис. 3.11. Координати контактних точок

Для моделювання поверхонь зубців просторового зачеплення використовувалася система гібридного моделювання PowerSHAPE, розроблена компанією Delcam plc (Велика Британія). Алгоритм створення поверхні наступний. У заданій системі координат вибирається команда

«Создать точку» . За допомогою подвійного кліка викликається командне вікно. Координати точок контактної лінії в отриманому текстовому файлі (рис.3.11) копіюються і вставляються після «Enter point>» в командне вікно (рис. 3.12).

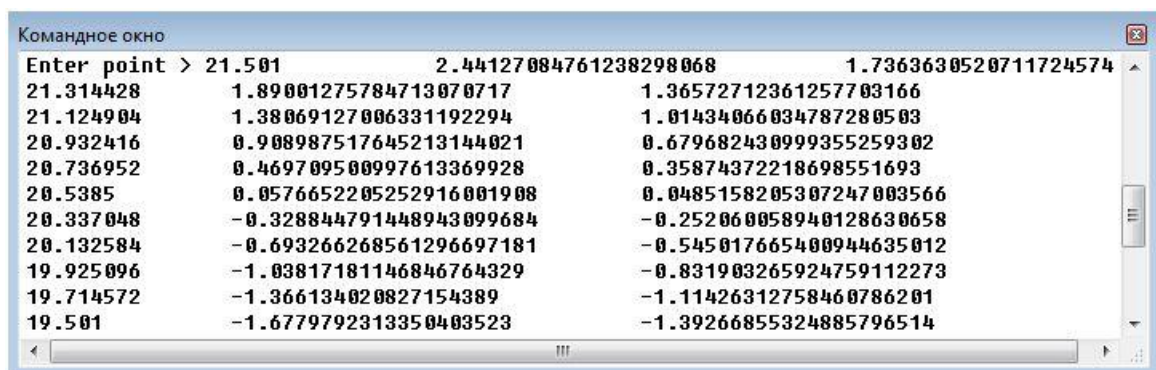


Рис. 3.12. Командне вікно

В результаті цих дій на екрані відображається група контактних точок, що описують контактну лінію в заданій системі координат (рис. 3.13).

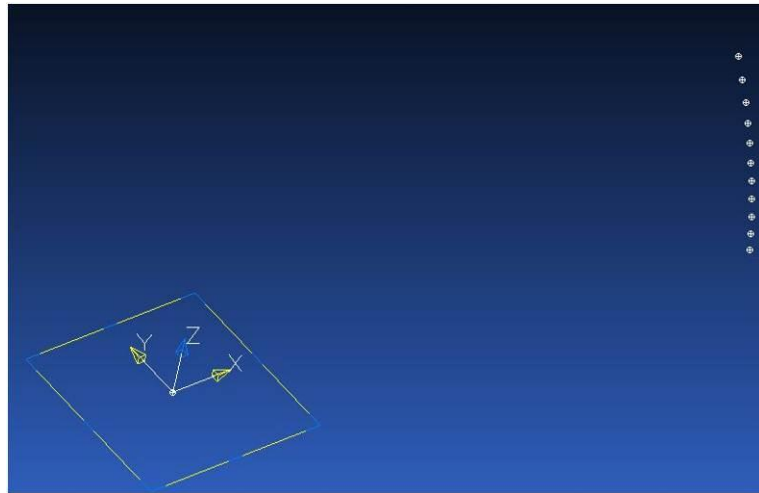


Рис. 3.13. Відображення контактних точок

Поєднуючи контактні точки сплайнами, отримуємо контактні лінії на робочій поверхні зуба (рис. 3.14 а).



а

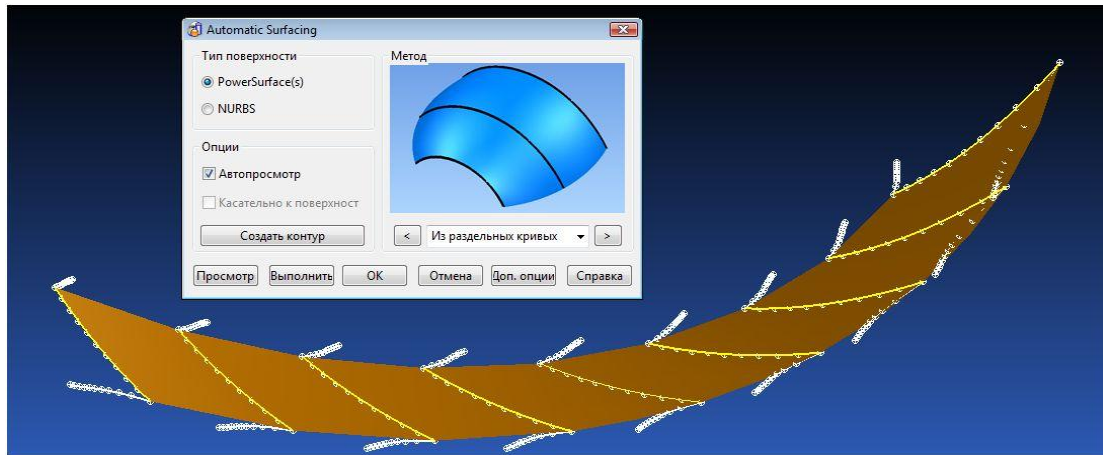


б

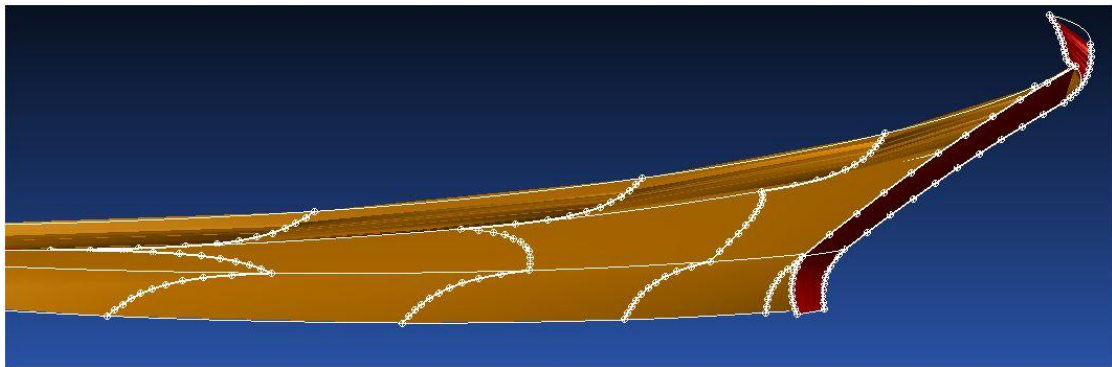
Рис. 3.14. Контактні лінії:

а - на робочій поверхні зуба б –на допоміжних ділянках

На рис. 3.14 б показані також контактні лінії на допоміжних ділянках зуба.



а)



б)

Рис. 3.15. Побудова поверхні зуба:

а – поверхня робочої ділянки зуба; б – поверхня з допоміжними ділянками

Далі по контактних лініях будується поверхня. На рис. 3.15а показано побудову поверхні робочої ділянки зуба, а на рис. 3.15б – поверхні зуба, включаючи допоміжні ділянки.

3.4. Аналіз ліній контакту і умов обкатки

3.4.1. Лінії контакту

Довжина контактної лінії пов'язана з розмірами зуба (витка), а також визначає в деякій мірі контактну та зламну міцність зубців.

З диференціальної геометрії відомо, що довжину кривої MM_1 можна обчислити з наступного аналітичного виразу [97]:

$$dS^2 = E_1 d\lambda^2 + 2F_1 d\lambda d\mu + G_1 d\mu^2 \quad (3.56)$$

де dS – довжина контактної лінії.

Визначаючи квадратний корінь з виразу (3.56) і інтегруючи в межах зміни λ , маємо вираз для визначення довжини контактної лінії

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt{E_1 + 2F_1 \frac{d\mu}{d\lambda} + G_1 \left(\frac{d\mu}{d\lambda}\right)^2} d\lambda \quad (3.57)$$

Підставляючи в цей вираз значення перших квадратичних форм, остаточно довжину контактної лінії отримаємо в наступному вигляді:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 + \left(\frac{d\mu}{dt}\right)^2} d\lambda, \quad (3.58)$$

де λ_1, λ_2 – відповідають точкам перетину контактних ліній з поверхнями виступів основного циліндричного колеса і основного гіперболоїдного колеса. Значення, що відповідає вершині зубців циліндричного колеса відомо. Що стосується λ , відповідного вершині основного гіперболоїдна колеса, то, в залежності від типу передач, рівняння для визначення його значення матимуть свій вигляд.

Ці рівняння легко отримати, знаючи рівняння поверхні, що відповідає вершинам зубців колеса (гіперболоїд, площину, конус, циліндр). При цьому необхідно використовувати рівняння (3.6) при $\varphi_1 = const$. $d\mu/d\lambda$ – легко визначити, диференціюючи рівняння (3.54) та (3.55) при $\varphi_1 = const$ [108].

Слід зазначити, що для деяких значень межі інтегрування в (3.57) визначаються точками перетину контактної лінії з торцями циліндричного колеса. В цьому випадку можна використовувати останню рівність (3.6) при заданих значеннях z_1 , що відповідають торцям циліндричного колеса.

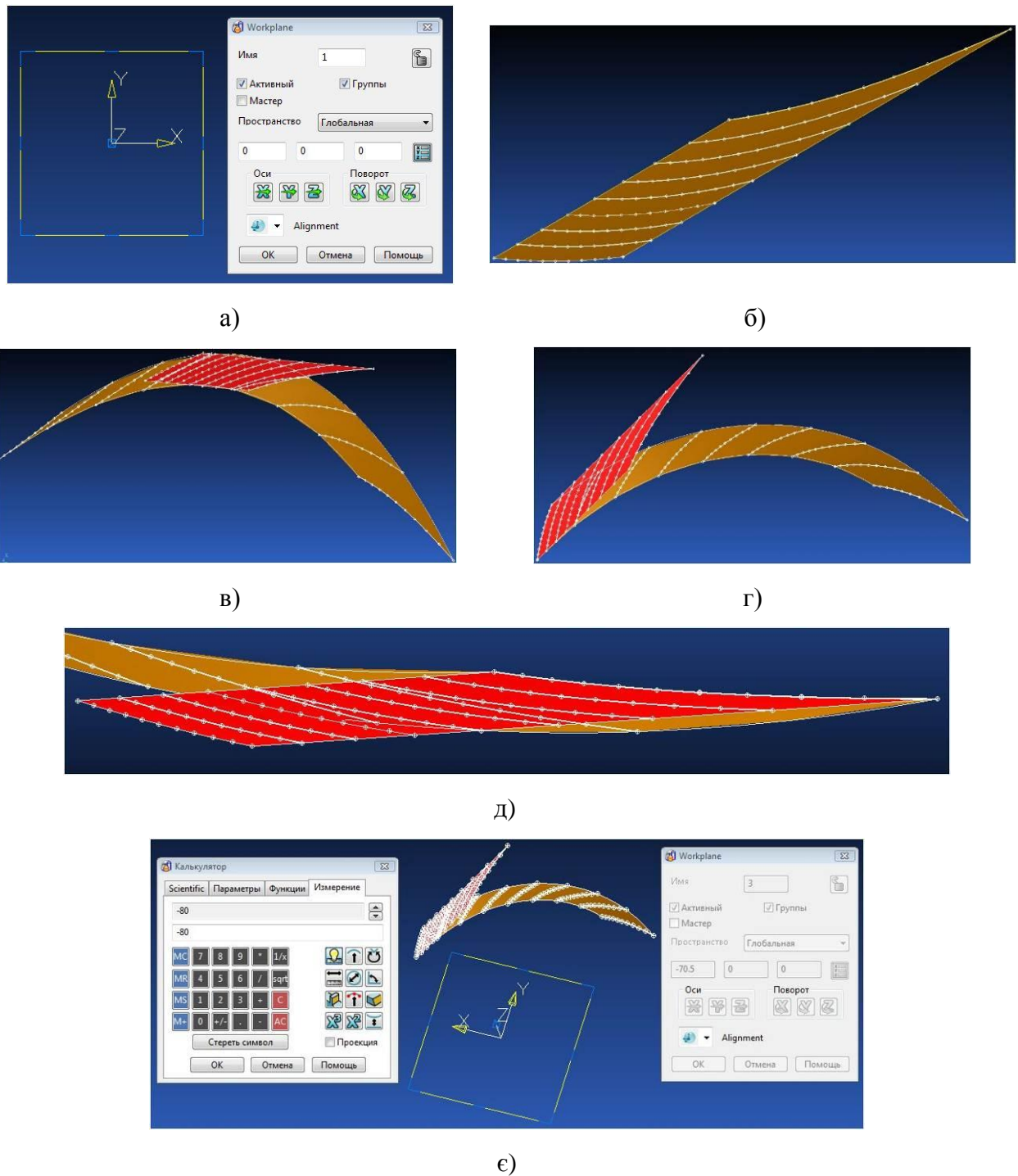


Рис. 3.16. Дослідження ліній контакту і умов обкатки:

б – поверхня зуба прямозубого колеса; контактування поверхонь зубців прямозубого колеса та гіперболоїдного інструменту по середній (в), початковій (г), кінцевій (д) лініям контакту; а, е – інструментальні панелі керування системами координат, пов'язаними з поверхнями зубців

На рис. 3.16 показаний аналіз ліній контакту і умов обкочування [63].

По довжині, формі і розташуванню контактних ліній на поверхні зубців інструменту і колеса можна судити про багато експлуатаційних властивостей проектного інструменту.

Алгоритм аналізу наступний. Спочатку в системі PowerSHAPE в глобальній системі координат створюємо систему координат, пов'язану з колесом та інструментом, відповідно (рис. 3.16а). У діалоговому вікні відзначаємо, що з даною системою буде пов'язана група об'єктів, створених в цій системі координат. В цьому випадку при повороті системи координат буде повертатися і пов'язана з нею поверхня зуба. На рис. 3.16,б показана поверхня зуба, створена за контактними номерами ліній в своїй системі координат. На рис. 3.16,в показано взаємодії поверхонь зубців колеса та інструменту при куті повороту інструмента 0^0 . При зміні кута повороту інструменту від -40^0 до $+40^0$ (рис. 3.16,д) поверхні колеса та інструменту перекочуються від одного торця (рис. 3.16,в) до іншого (рис. 3.16,г).

Більшість геометричних та кінематичних показників аналізуються в напрямку, перпендикулярному лінії контакту. Це перш за все наведена кривизна і сумарна швидкість переміщення точок контакту.

3.4.2. Функціональні обмеження передач з перехресними осями

Коефіцієнт перекриття є важливим показником працездатності гіперболоїдної передачі, оскільки він визначає кількість зубців, які беруть участь одночасно в роботі. Чим більше зубців контактує, тим плавніше йде робота. При розгляді питання про коефіцієнт перекриття, будемо враховувати осьове і профільне перекриття [6], [23], [37], [43].

Нехай λ_1 відповідає точці, розташованій на вершині зубців циліндричного колеса, λ_2 – точці, розташованій на вершині зубців гіперболоїдного колеса в перерізі $z = z$. Тоді з рівняння (3.53) визначимо

$$\begin{aligned}
z = & -[a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 - f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_1) + (1 - u_{21} \cos \gamma)(f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y) + \\
& + f_1'(\lambda, P_x) f_1(\lambda, P_x))] / u_{21} \sin \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1) \quad (3.59) \\
z = & -[a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \sin \varphi_2 - f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_2) + (1 - u_{21} \cos \gamma)(f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y) + \\
& + f_1'(\lambda, P_x) f_1(\lambda, P_x))] / u_{21} \sin \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_2 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_2)
\end{aligned}$$

Обчисливши кути φ_1, φ_2 , отримаємо співвідношення для визначення коефіцієнта торцевого перекриття ε_s :

$$\varepsilon_s = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) z_1}{2\pi} \quad (3.60)$$

де z_1 – кількість зубців циліндричного колеса.

Рівняння (3.59) можна вирішити методом послідовних наближень або будь-яким іншим методом чисельного аналізу.

Коефіцієнт осьового перекриття можна визначити наступним чином. Нехай задано значення $\lambda = \lambda_0$ і значення, на відповідних торцях циліндричного колеса $z = z_1$, $z = z_2$, де z_1, z_2 – значення для першого і другого торців циліндричного колеса.

Підставивши в рівняння (3.59) замість z значення z_1 і замість λ значення λ_0 , отримаємо рівняння для визначення φ_{10} . При $z = z_2$ отримаємо рівняння для визначення φ_{20} . Тоді коефіцієнт осьового перекриття при $\lambda = \lambda_0$ буде дорівнювати

$$\varepsilon_a = \frac{(\varphi_{20} - \varphi_{10}) z_1}{2\pi} \quad (3.61)$$

де ε_a – коефіцієнт осьового перекриття.

Очевидно, коефіцієнт перекриття ε_s (3.60) при переході від одного перерізу z до іншого буде змінюватися. Змінюється і осьовий коефіцієнт перекриття ε_a при зміні λ_0 .

$$E_1 F' - E_1 F^\mu (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)}) - F^\lambda (\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) = 0 \quad (3.62)$$

де $F^{\varphi_1}, F^\mu, F^\lambda$ – частинні похідні, знаходимо з рівняння верстатного зачеплення (3.51), а $(\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}), (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})$ визначимо з виразів (3.14) і (3.50).

Залежність (3.62) дозволяє визначити граничні точки на поверхні зубців циліндричних коліс. При цьому, наприклад, для прямозубого колеса необхідно використовувати рівняння зачеплення (3.51) і рівняння поверхні зубців колеса (3.13). Знаходження граничних точок можна робити в такий спосіб. З рівняння зачеплення (3.51) визначаємо $\mu = \mu(\lambda, \varphi_1)$ за формулою (3.53). При заданому значенні μ з (3.62) визначаємо $\lambda = \lambda(\varphi_1)$. Після чого для кожного значення φ_1 в межах поля нарізування визначимо координати граничних точок. Зауважимо, що для конкретного виду передач послідовність знаходження граничних точок може бути змінена. При цьому необхідно граничні точки визначати для обох сторін зубців, оскільки умови підрізання в загальному випадку для кожної сторони зуба циліндричного колеса не однакові. Зауважимо, що верстатне зачеплення, що розглядається, буде працездатним, якщо один з коефіцієнтів ε_a або ε_s матиме значення більше одиниці.

3.4.3. Умови підрізання зубців

Підрізання зубців циліндричного колеса, викликає зменшення робочих ділянок поверхонь, негативно впливає на міцність зубців, оскільки підрізання послаблює основу зубців і, тим самим, призводить до зниження зламної стійкості зубців. Тому при створенні зубчастих передач необхідно

обмежувати твірну поверхню, виключаючи з неї особливі точки [43], [134], [136], [177], [178], [256], [269].

Для визначення умов відсутності підрізання зубців колеса, що нарізується, скористаємося методом, викладеним в роботах [42], [43], [134], [178]. Використовуючи системи рівнянь з цих робіт для однопараметричного огинання і замінивши незалежні параметри $Ui\mathcal{G}$ відповідно параметрами $\lambda i\mu$, отримаємо

$$\begin{vmatrix} F^{\lambda} & F^{\mu} & F' \\ E_1 & F_1 & (\bar{r}_1^{\lambda} \bar{V}_1^{(12)}) \\ F_1 & G_1 & (\bar{r}_1^{\mu} \bar{V}_1^{(12)}) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.63)$$

У цій рівності змінені позначення відповідно на наступні

$$\begin{aligned} f_1^U &= F^{\lambda}; \quad f_1^{\mathcal{G}} = F^{\mu}; \quad f_1' = F'; \\ (\bar{r}_1^U \bar{r}_1^U) &= (\bar{r}_1^{\lambda} \bar{r}_1^{\lambda}) = E_1; \quad (\bar{r}_1^U \bar{r}_1^{\mathcal{G}}) = (\bar{r}_1^{\lambda} \bar{r}_1^{\mu}) = F_1; \\ (\bar{r}_1^U \bar{V}_1') &= (\bar{r}_1^{\lambda} \bar{V}_1^{(12)}); \quad (\bar{r}_1^{\mathcal{G}} \bar{r}_1^{\mathcal{G}}) = (\bar{r}_1^{\mu} \bar{r}_1^{\mu}) = G_1 \\ (\bar{r}_1^{\mathcal{G}} \bar{V}_1') &= \bar{r}_1^{\mu} \bar{V}_1^{(12)} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Рівність (3.63) є додатковою умовою для визначення особливих точок на поверхні, що нарізується.

Граничні точки на поверхні зубців циліндричних коліс отримаємо, розкриваючи визначник (3.63). З урахуванням співвідношень (3.46), отримаємо

$$E_1 F' - E_1 F^{\mu} (\bar{r}_1^{\mu} \bar{V}_1^{(12)}) - F^{\lambda} (\bar{r}_1^{\lambda} \bar{V}_1^{(12)}) = 0 \quad (3.65)$$

де $F^{\varphi 1} = F'$, F^{λ} , F^{μ} – знаходимо з рівняння верстатного зачеплення (3.51),

$a(\bar{r}_1^{\lambda} \bar{V}^{(12)}); (\bar{r}_1^{\mu} \bar{V}^{(12)})$ – визначимо з виразів (3.14) та (3.50).

Залежність (3.65) дозволяє визначити граничні точки на поверхні зубців циліндричного колеса. При цьому необхідно використовувати рівняння верстатного зачеплення (3.51) і рівняння поверхні зубців циліндричного колеса (3.13). Відшукування граничних точок здійснюється в такий спосіб [43]. З рівняння верстатного зачеплення (3.51) визначаємо $\mu = \mu(\lambda, \varphi_1)$ за формулою (3.53). При цьому значенні μ з (3.65) визначимо $\lambda = \lambda(\varphi_1)$. Після чого, для кожного значення φ_1 в межах поля зачеплення, визначимо координати граничних точок, використовуючи рівняння (3.13). Зауважимо, що для конкретного виду верстатного зачеплення послідовність знаходження граничних точок може бути змінена. При цьому необхідно граничні точки визначати для обох сторін зубців, оскільки умови підрізання в загальному випадку для кожної сторони зуба циліндричного колеса неоднакові.

3.5. Кінематичні схеми формоутворення 2-го класу

3.5.1. Перетворення координат кінематичних схем формоутворення 2-го класу

Системи координат кінематичної схеми формоутворення 2-го класу першого і другого типу представлені на рис. 3.17.

Початковий циліндр заготовки перекочується по початковій площині твірної поверхні. Площина $Y_n O_n Z_n$ є початковою площиною рейки, площина YOZ збігається з площиною $Y_n O_n Z_n$, при цьому вісь OZ збігається з полюсною прямою. Вісь OY співпадає з віссю $O_n Y_n$. Площина YOX проходить через середній торцевий перетин передачі. Вісі $O_1 Z_1$ та $O_2 Z_2$ є осями обертання коліс, що нарізуються, і паралельні осі OZ . R_1 і R_2 – радіуси початкових циліндрів, а φ_1 й φ_2 – кути повороту шестерні і колеса. Надалі індексом «1» будемо позначати елементи, які відносяться до шестерні, індексом «2» – елементи, які відносяться до колеса. При повороті заготовки на кут φ_i твірна

поверхня переміститься на величину $R_i\varphi_i$.

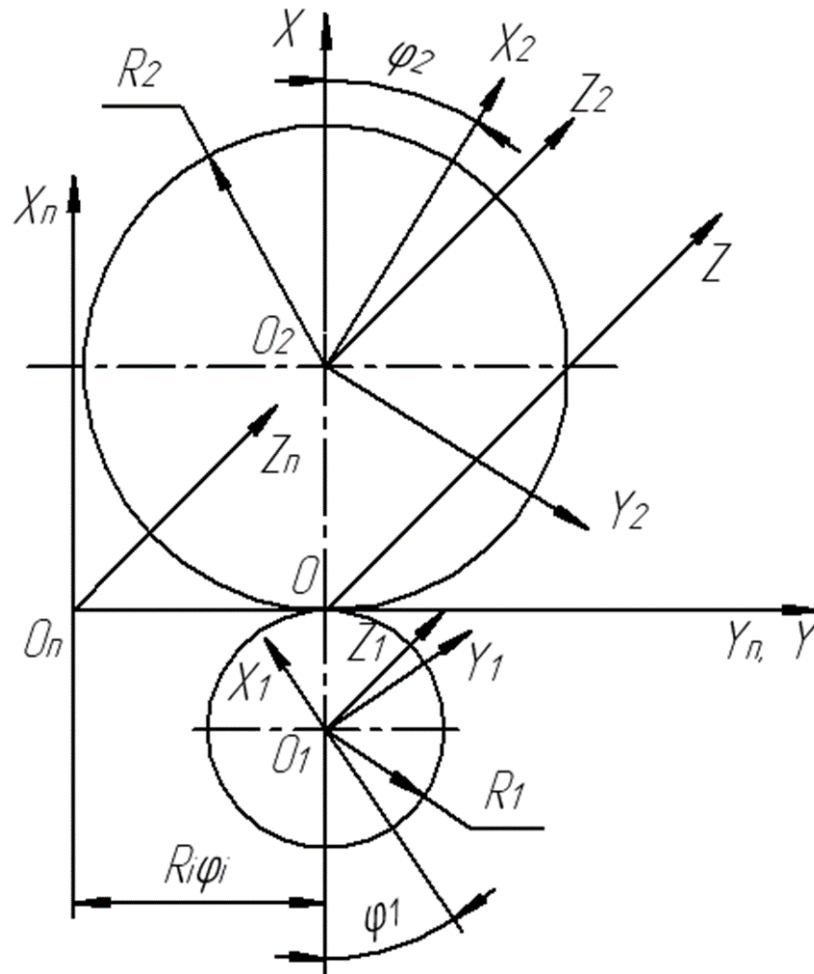


Рис. 3.17. Системи координат:

S_1 – система координат, пов’язана з ведучим зубчастим колесом (шестернею);

S_2 – система координат, пов’язана з веденим зубчастим колесом; S –
нерухома система координат.

Перехід від однієї системи координат до іншої здійснюватимемо матричних способом.

Матричне подання другого типу кінематичної схеми формоутворення 2–го класу

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{6_{2p}}(\varphi_2) \cdot M_{1_{pl}}(R_1 + R_2) \cdot M_{4_{lm}}(0) \cdot M_{3_{mk}}(0) \cdot M_{6_{k1}}(\varphi_1) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$$

Воно відповідає матричному поданню кінематичної схеми

формоутворення 3-го класу за умови, коли кут схрещування між осями дорівнює 0^0 , тобто осі обертання аксоїдів паралельні.

Зв'язок огинання

$$\vec{n}_1 \vec{V}_1^{(12)} = 0$$

і функціональний зв'язок

$$u = \omega_2 / \omega_1$$

залишаються без змін.

Надалі нам знадобляться наступні матриці переходу [217]:

– матриця переходу від системи координат S_n до S буде мати вигляд:

$$M_{0n} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -R_i \varphi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.66)$$

– матриця переходу від системи координат S до S_i :

$$M_{i0} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & \mp \sin \varphi_i & 0 & \pm R_i \cos \varphi_i \\ \pm \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & R_i \sin \varphi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.67)$$

– матриця переходу від системи координат S_n до S_i :

$$M_{in} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & \mp \sin \varphi_i & 0 & \pm R_i (\cos \varphi_i + \varphi_i \sin \varphi_i) \\ \pm \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & R_i (\sin \varphi_i - \varphi_i \cos \varphi_i) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.68)$$

– зворотна матриця переходу від системи координат S_i до S_n :

$$M_{ni} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & \pm \sin \varphi_i & 0 & \mp R_i \\ \mp \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & R_i \varphi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.69)$$

Нам також знадобиться похідна матриці (3.68) по параметру φ_i

$$\frac{dM_{in}}{d\varphi_i} = \begin{vmatrix} -\sin \varphi_i & \mp \cos \varphi_i & 0 & \pm R_i \varphi_i \cos \varphi_i \\ \pm \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 & R_i \varphi_i \sin \varphi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.70)$$

Тут $i=1$ для шестірні, $i=2$ для колеса; верхній знак відповідає шестірні, нижній – колесу.

Матриця переходу від системи координат S_1 у S_2 має вигляд

$$M_{21} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) & 0 & (R_1 + R_2) \cos \varphi_2 \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & 0 & (R_1 + R_2) \sin \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.71)$$

Матричне подання першого типу кінематичної схеми формоутворення 2-го класу

$$\bar{r}_i(\lambda, \mu, P, N) = M_{6is}(\varphi_i) \cdot M_{1s0}(R_i) \cdot M_{20n}(y_n) \cdot \bar{r}_n(\lambda, \mu, P, N)$$

Функціональний зв'язок

$$y_n = R_i \cdot \varphi_i.$$

Застосовуючи матрицю (3.66) для перетворення координат поверхні (2.32), отримуємо в нерухомій системі координат S рівняння твірної поверхні у вигляді

$$\begin{aligned} x &= f_1(\lambda, P_x); \\ y &= y_n(\mu, N) + f_2(\lambda, P_y) \cos \beta - R_i \varphi_i; \\ z &= z_n(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \end{aligned} \quad (3.72)$$

3.5.2. Зв'язки огинання для схем формоутворення 2-го класу

Зв'язки огинання поверхні зубців та інструментальної поверхні пов'язана з виразом: [179]

$$F_i = \bar{V}^{ni} \cdot \bar{e}_n = 0, \quad (3.73)$$

де \bar{e}_n – одиничний вектор нормалі (2.40);

\bar{V}^{ni} – відносна швидкість у верстатному зачепленні інструментальної поверхні з нарізаним колесом [137]:

$$\bar{V}^{ni} = M_{ni} \frac{dM_{in}}{d\varphi_i} \bar{r}_n. \quad (3.74)$$

Враховуючи (3.69), (3.70) і (2.32) маємо

$$\bar{V}^{ni} = [\mp y_n(\mu, N) \mp f_2(\lambda, P_y) \cos \beta \pm R_i \varphi_i] \cdot \bar{i} \pm f_1(\lambda, P_x) \cdot \bar{j}. \quad (3.75)$$

Для отримання дійсного значення відносної швидкості необхідно праву частину виразу (3.75) помножити на кутову швидкість ω_i .

Підставляючи в (3.73) значення (2.40) і (3.75), отримуємо рівняння зв'язку огинання у вигляді:

$$F_i(\lambda, \mu, P, N) = [\pm y_n(\mu) \pm \Omega_2(\lambda, \mu, P, N) \cdot \cos \beta \mp R_i \varphi_i] \cdot \sin \alpha = 0, \quad (3.76)$$

де
$$\Omega_2 = \Omega_1 + f_2(\lambda, P_y); \quad \Omega_1 = \frac{f_1(\lambda, P_x) \cdot f_1'(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)}.$$

Рівняння (3.72) спільно з (3.76) визначає поверхню верстатного зачеплення, тобто геометричного місця точок, в яких відбувається контакт інструментальної поверхні і нарізуваної поверхні. Виключивши з цих рівнянь один з параметрів, наприклад φ_i , отримаємо рівняння поверхні верстатного зачеплення в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x &= f_1(\lambda, P_x); \\ y &= -\Omega_1 \cos \beta; \\ z &= z_n(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \end{aligned} \quad (3.77)$$

При використанні для нарізування зубців шестерні і колеса однієї і тієї ж твірної поверхні матимемо випадок лінійного контакту в робочому зачепленні. Для зубчастих передач, нарізаних без зміщення інструмента, поверхня верстатного зачеплення збігається з поверхнею робочого зачеплення коліс.

При $z = \text{const}$ рівняння (3.77) визначає лінію верстатного зачеплення в

торцевій площині. Для передач з лінійним контактом ця лінія верстатного зачеплення буде лінією робочого зачеплення коліс в торцевій площині. Для передач з точковим контактом лінія зачеплення в торцевій площині вироджується в точку.

При $\varphi_i = \text{const}$ рівняння (3.72) і (3.76) визначають лінію миттєвого контакту (характеристику) твірної поверхні і поверхонь зубців нарізуваних коліс, яка для передач, нарізаних без зміщення інструменту збігається з лінією миттєвого контакту зубців коліс, які зачіпляються.

Відносна швидкість в верстатному зачепленні з урахуванням (3.75) і (3.76) визначається для $\omega_i = 1$ по формулі:

$$\bar{V}^{ni} = \pm \Omega_1 \cos \beta \bar{i} \pm f_1(\lambda, P_x) \bar{j}. \quad (3.78)$$

3.5.3. Параметри поверхонь зубців нарізуваних коліс

Для визначення рівнянь поверхонь зубців нарізуваних коліс необхідно представити рівняння поверхні верстатного зачеплення в системах координат S_1 або S_2 . Для цього скористаємося матрицею переходу (3.67). Рівняння поверхонь контактуючих зубців в системі координат S_i мають вигляд:

$$\begin{aligned} x_i &= [f_1(\lambda, P_x) \pm R_i] \cos \varphi_i \pm \Omega_1 \cos \beta \sin \varphi_i; \\ y_i &= [R_i \pm f_1(\lambda, P_x)] \sin \varphi_i - \Omega_1 \cos \beta \cos \varphi_i; \\ z &= z_n(\mu, N) - f_2(\lambda, P_y) \sin \beta. \end{aligned} \quad (3.79)$$

Рівняння (3.79) дозволяють визначити товщину зубців при розрахунку на згин, а також контрольні розміри нарізуваних зубчастих коліс.

При $\varphi_i = \text{const}$ рівняння (3.79) є рівняннями миттєвих ліній контакту коліс, зачеплення. При $z = \text{const}$ ці рівняння описують профілі зубців шестерні та колеса в торцевому перетині, а при $\beta = \text{const}$ – профілі зубців в нормальному перетині.

При $\lambda = const$ рівняння (3.79) являють собою рівняння гвинтових ліній. Радіуси циліндрів, на яких розташовані ці лінії, можна визначити за формулою $R_{bi} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ або, з урахуванням (3.79),

$$R_{bi} = \sqrt{\left[f_1(\lambda, P_x) \pm R_i \right]^2 + (\Omega_1 \cos \beta)^2}, \quad (3.80)$$

де верхній знак для шестерні, нижній – для колеса.

Оскільки β в загальному випадку величина змінна, то при $\lambda = const$ R_{b1} і R_{b2} змінюються уздовж зубчастого вінця.

Рівняння (3.80) можна використовувати для визначення λ , відповідного граничним точкам поля зачеплення передач. Для цього в праві частини співвідношення (3.80) необхідно підставити значення R_{a1} та R_{a2} – радіусів кіл вершин зубців, відповідно, шестерні і колеса, та вирішити їх щодо λ . Отримані значення λ дозволяють визначати деякі показники працездатності нарізаних передач.

Для визначення товщини зубців у торцьовому перерізі необхідно задати значення z_i і з останнього рівняння (3.80) визначити $\mu(\lambda)$. Далі, при заданих R_{b1} і R_{b2} з рівняння (3.80) визначити λ_1 і λ_2 , а з рівняння зачеплення (3.76) кут φ_i .

Підставляючи отримані μ , λ , φ в перші два рівняння (3.79), знаходимо координати профілю зуба в торцьовому перерізі для заданих R_{b1} і R_{b2} .

Для симетричного вихідного контуру товщина зуба нарізаного колеса в торцевому перетині дорівнює

$$S = 2 \cdot |y_i| = 2 \cdot \left| \left[R_i \pm f_1(\lambda, P_x) \right] \sin \varphi_i - \Omega_1 \cos \beta \cos \varphi_i \right|. \quad (3.81)$$

Відстань від вершини зуба до вимірювальної хорди (вимірювальна висота) дорівнює $h^* = R_{ai} - x_i$, де x_i – визначаються з першого рівняння (3.79).

Для несиметричного вихідного контуру необхідно визначити позитивні та негативні значення y_i і, для отримання S , значення y_i підсумовувати за абсолютною величиною.

При визначенні товщини зубців у співвідношеннях (3.80) замість R_{bi} необхідно прийняти R_{ai} .

3.5.4. Інтерактивне керування процесом формоутворення для кінематичних схем формоутворення 2-го класу

Використовуючи наведені вище математичні залежності, було розроблено програмне забезпечення «SAlAT», призначене для комплексного параметричного моделювання систем і процесів формоутворення функціональних поверхонь [236]. Воно дозволяє (рис. 3.18) за допомогою курсору безпосередньо на екрані монітора, керувати:

- геометрією вихідного контуру твірної поверхні;
- формою робочих ділянок кривих, що описують зубці шестірні і колеса в нормальному перерізі;
- формою лінії зачеплення, яка представляє собою геометричне місце точок контакту шестерні, колеса і твірної поверхні рейкового типу в заданому перерізі.

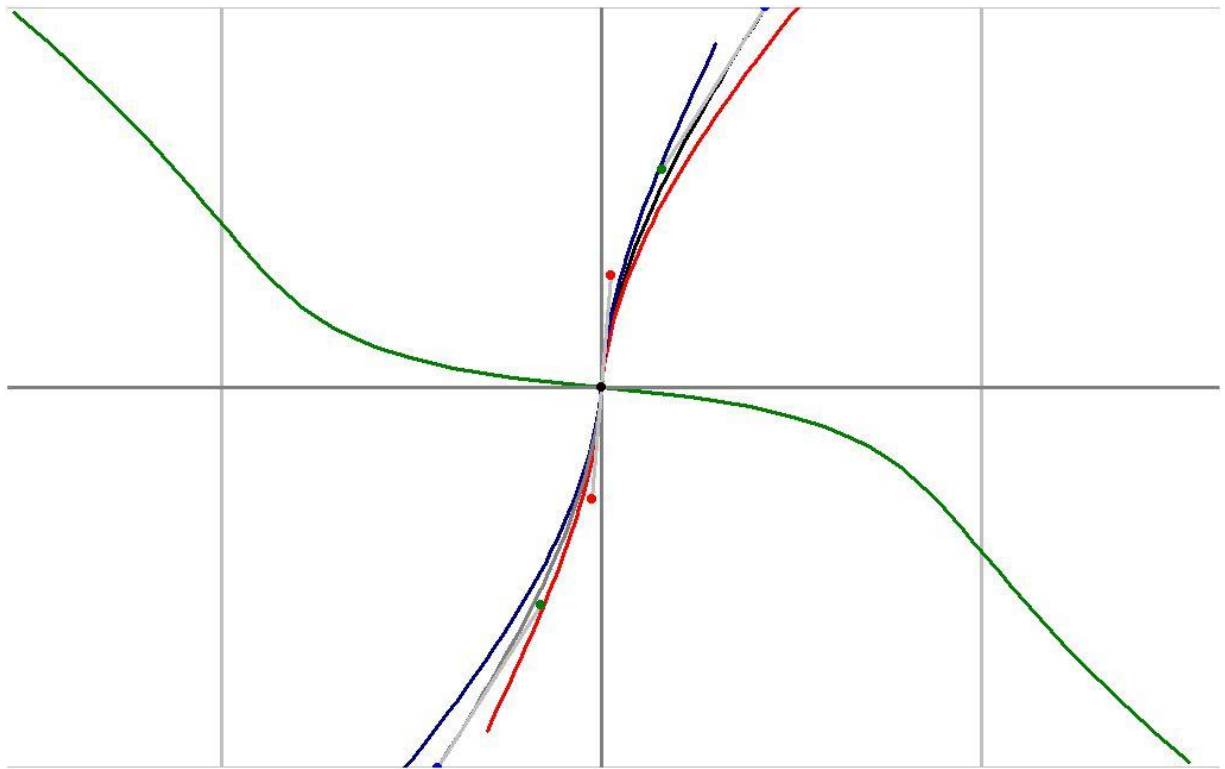


Рис. 3.18. Керування елементами системи формоутворення

На рис. 3.19 показана копія екрану монітора з відповідними поясненнями. На цьому малюнку видно, що при зміні кривої вихідного контуру твірної поверхні I за допомогою керуючих точок 4 кривої Безьє, відбувається зміна кривих, що описують робочу ділянку зубців шестерні і колеса.

Аналогічно, на рис. 3.20, можна спостерігати, як при зміні кривої вихідного контуру твірної поверхні за допомогою керуючих точок кривої Безьє 3-го порядку, відбувається зміна лінії зачеплення.

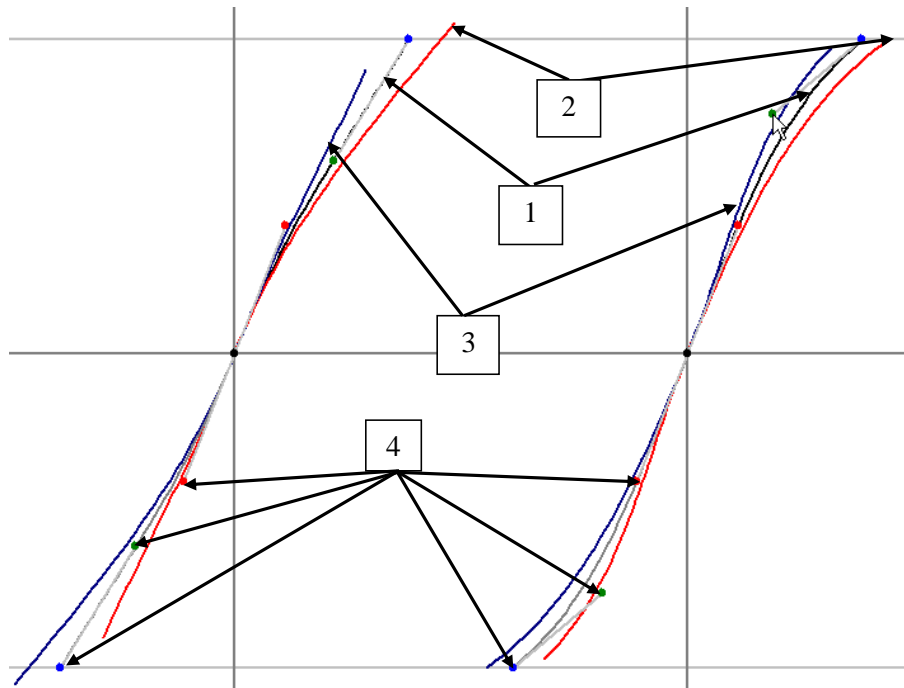


Рис. 3.19. Керування робочими ділянками зубців:

- 1 - крива вихідного контуру твірної поверхні; 2 - крива, що описує робочу ділянку зуба шестерні; 3 - крива, що описує робочу ділянку зуба колеса;
4 - керуючі точки кривої Безьє 3-го порядку

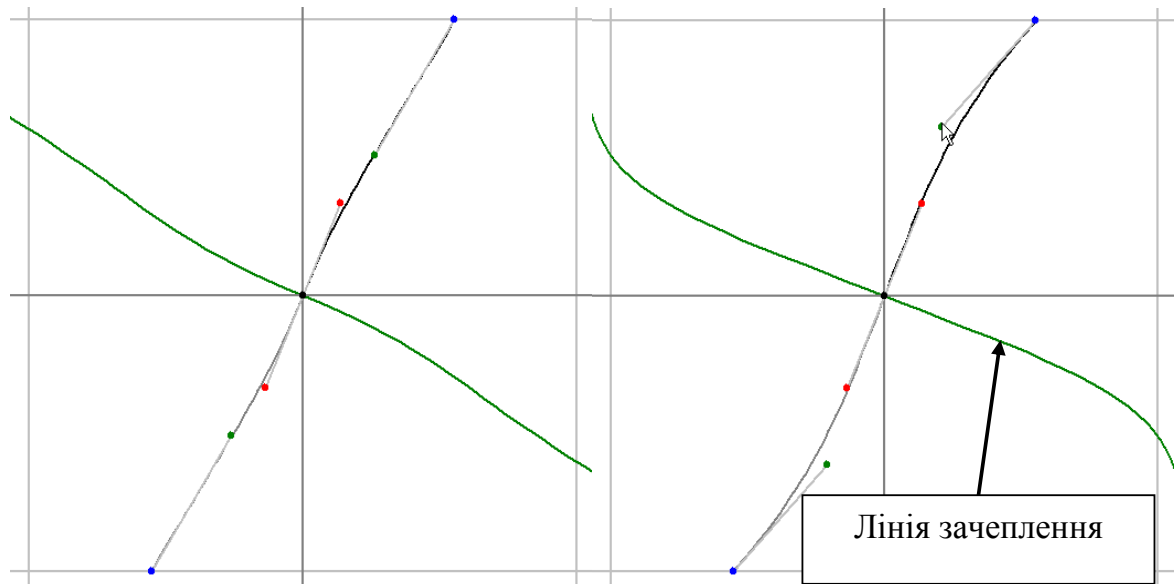


Рис. 3.20. Керування лінією зачеплення

На рис. 3.21 показано три положення кривих, отриманих в процесі обкатки шестерні, колеса і твірної поверхні.

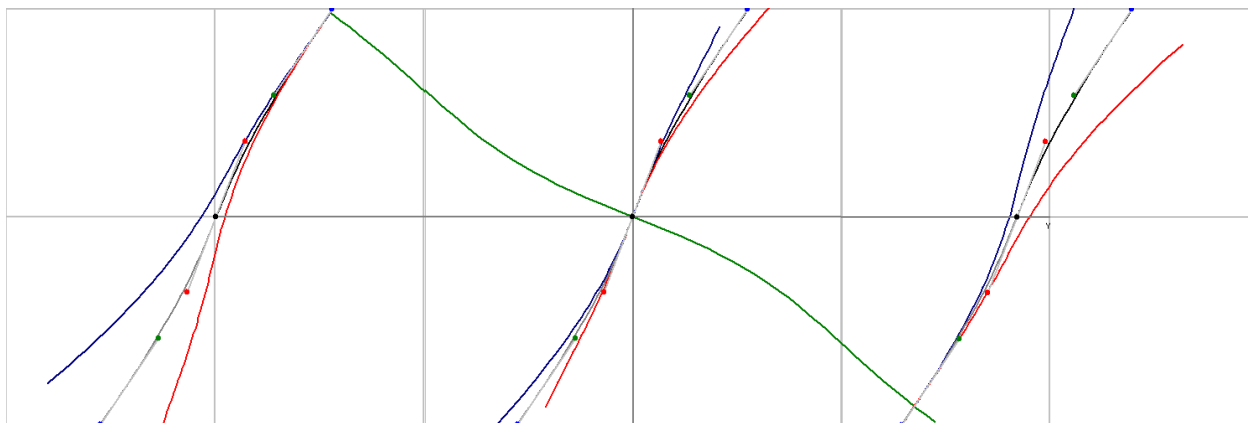


Рис. 3.21. Аналіз взаємодії елементів в процесі обкатки

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано новий підхід до узагальненого опису функції формоутворення, заснований на її матричному представленні і уніфікованих керуючих параметрах кривої, яка описує профіль зуба, що дозволило уніфікувати математичний опис і реалізувати інтерактивне керування структурою системи формоутворення.

Суть нововведення полягає в тому, що перехід від системи координат оброблюваної поверхні до системи координат інструментальної поверхні здійснюється за допомогою добутку одного й того ж набору елементарних матриць четвертого порядку, кожна з яких характеризує тільки один елементарний поступальний або обертальний рух між сусідніми ланками і визначається одним параметром, що відповідає значенням цього руху, а перехід від одного класу кінематичної схеми формоутворення до іншого відбувається обнуленнями параметра відповідної матриці. Варіювання параметрів матриць дозволяє автоматизувати вибір кращої схеми формоутворення, структури формоутворюючої системи та відповідної інструментальної поверхні.

2. Розглянуті нові можливості використання кінематичних схем формоутворення, запропонованих професором П.Р. Родіним в частині окремих типів кінематичних схем формоутворення 3-го класу. Додано нові

типи кінематичних схем формоутворення 3-го класу, використання яких розширює технологічні можливості механічної обробки деталей, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій. Це створило передумови для створення прогресивних інструментів, а саме гіперболоїдних фрез, хонів, шліфувальних кругів, притирів, накатників.

3. Отримано і проаналізовано зв'язані поверхні деталей та інструментів, які взаємодіють в процесі формоутворення. Отримано математичний опис і виконано аналіз ліній контакту спряжених поверхонь.

4. Для кінематичних схем формоутворення 2-го класу отримано уніфікований опис функції формоутворення в матричному вигляді, отримані математичні залежності для опису спряжених поверхонь. Наведено комп'ютерну реалізацію процесу інтерактивного керування формою профілів зубців зубчастих коліс та інструментальної поверхні.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [28], [50], [56], [57], [58], [64], [90], [205], [236], [237].

РАЗДЕЛ 4

ГЕОМЕТРИЧНІ ТА КІНЕМАТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

Для попередньої оцінки умов взаємодії інструментальних і оброблюваних поверхонь в процесі формоутворення зубчастих коліс та взаємодії функціональних поверхонь зубців зубчастих передач використовуються такі геометричні та кінематичні показники [28], [92], [101], [162], [289]:

1. *Відносна швидкість ковзання поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення.* Характеризує продуктивність процесів механічної обробки, зношування інструменту та контактуючих поверхонь зубців зубчастих коліс в процесі їх експлуатації.

2. *Кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній.* Характеризує якість і продуктивність обробки деталей, гідродинамічні умови змащення зубчастих передач.

3. *Приведена кривизна в напрямку, перпендикулярному лінії контакту поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення.* Характеризує сили різання, пластичної деформації, навантажувальну здатність функціональних поверхонь зубців зубчастих коліс в процесі їх експлуатації.

4. *Сумарна швидкість переміщення точок контакту поверхонь, що беруть участь у процесі формоутворення.* Характеризує продуктивність процесу формоутворення, гідродинамічні умови змащування.

5. *Коефіцієнти питомих ковзань.* Характеризують продуктивність механічного оброблення, зношування інструменту та функціональних поверхонь зубців зубчастих коліс в процесі їх експлуатації.

Проведемо детальний аналіз суті наведених вище геометричних та кінематичних показників, а також їх впливу на процеси формоутворення і експлуатації зубчастих коліс.

4.1. Аналіз відносної швидкості ковзання поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення

Розглянемо гіперболоїдну пару, що складається з циліндричного прямозубого (косозубого) колеса та гіперболоїдного інструменту. Цілком зрозуміло, що в цьому випадку циліндричному колесу з кількістю зубців z_1 , з модулем m та різними кутами схрещування γ будуть відповідати багато гіперболоїдних інструментів при заданій різній кількості зубців z_2 . В даному випадку будемо мати гіперболоїдну пару, зубчасте колесо та інструмент якої матимуть спряжені поверхні зубців з лінійним контактом, так як твірна циліндрична поверхня для одного з них збігається з головною поверхнею парного зубчастого колеса.

В даному випадку рух поверхні циліндричного колеса щодо гіперболоїдного інструменту буде миттєвим гвинтовим рухом, який є результатом двох обертань навколо перехресних осей [232]. В даному випадку відносний рух циліндричного колеса щодо гіперболоїдного інструменту можна уявити як кочення з ковзанням циліндра по гіперболоїду (рис. 4.1). Осі прямозубого циліндричного колеса 1 та гіперболоїдного інструмента 2 схрещуються в просторі під кутом γ .

Ковзання, що виникає в процесі зачеплення профілів визначається з рис. 4.1 наступним рівнянням [14], [32], [38], [41], [45], [109], [156]:

$$[V^{(12)}]^2 = [V_x^{(12)}]^2 + [V_y^{(12)}]^2 + [V_z^{(12)}]^2, \quad (4.1)$$

де $V_x^{(12)}$, $V_y^{(12)}$, $V_z^{(12)}$ – визначаються з рівнянь (3.31), в яких x , y , z мають значення, що визначаються залежностями (3.10).

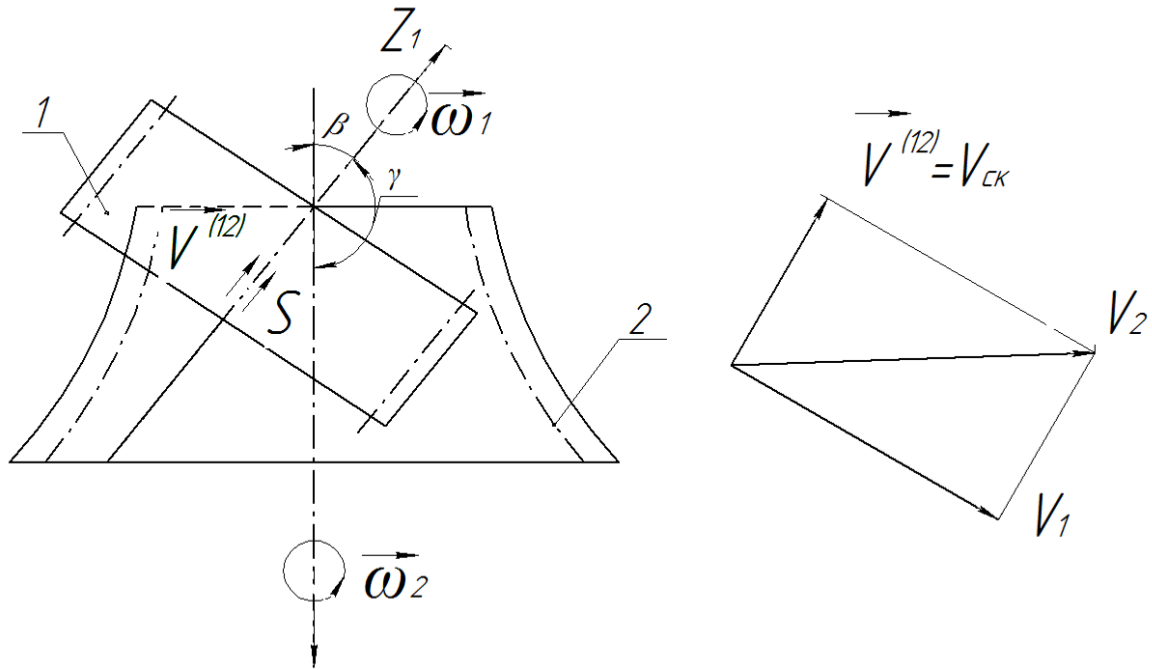


Рис. 4.1. Відносна швидкість ковзання

Підставляючи ці значення x , y , z до рівняння (3.31), отримаємо проекції відносної швидкості в такому вигляді:

$$V_x^{(12)} = -(f_1(\lambda, P_x) \sin \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \cos \varphi_1)(1 - u_{21} \cos \gamma) + \\ [a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) - f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_1) - (1 - u_{21} \cos \gamma)(f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y) + \\ + f_1'(\lambda, P_x) f_1(\lambda, P_x))] / (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1); \quad (4.2)$$

$$V_y^{(12)} = (f_1(\lambda, P_x) \cos \varphi_1 - f_2(\lambda, P_y) \sin \varphi_1)(1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma;$$

$$V_z^{(12)} = (f_1(\lambda, P_x) \cos \varphi_1 - f_2(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 + a_w) u_{21} \sin \gamma.$$

Використовуючи рівняння (4.1), визначаємо швидкість ковзання в точках профілів коліс. Так як при $\varphi_1 = \text{const}$ рівняння (4.1) визначає відносну швидкість в точках контактних ліній, при $z = \mu = \text{const}$ – відносну швидкість в точках профілю зубців колеса, а при $\lambda = \text{const}$ – матимемо зміну відносної швидкості по довжині зуба.

Прирівнюючи праву частину рівняння (4.1) до нуля, отримуємо

рівняння для визначення параметрів, що характеризують точки на поверхні циліндричного колеса, в яких швидкість ковзання дорівнює нулю. Це означає, що необхідно змінювати геометричні параметри циліндричних коліс і гіперболоїдних інструментів так, щоб розглянута швидкість була б мінімальною.

Для отримання істинних значень проекцій відносної швидкості необхідно праві частини рівнянь (4.2) помножити на кутову швидкість циліндричного колеса $\vec{\omega}_1$ [49], [54], [57].

В роботі виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку відносної швидкості ковзання при накатці зубчастих коліс інструментом з евольвентним профілем витків [60] та інструментом з профілем, описаним кривою Безьє 3-го порядку, отриманою в результаті апроксимації евольвенти. Результати розрахунків практично збіглися (рис. 4.2).

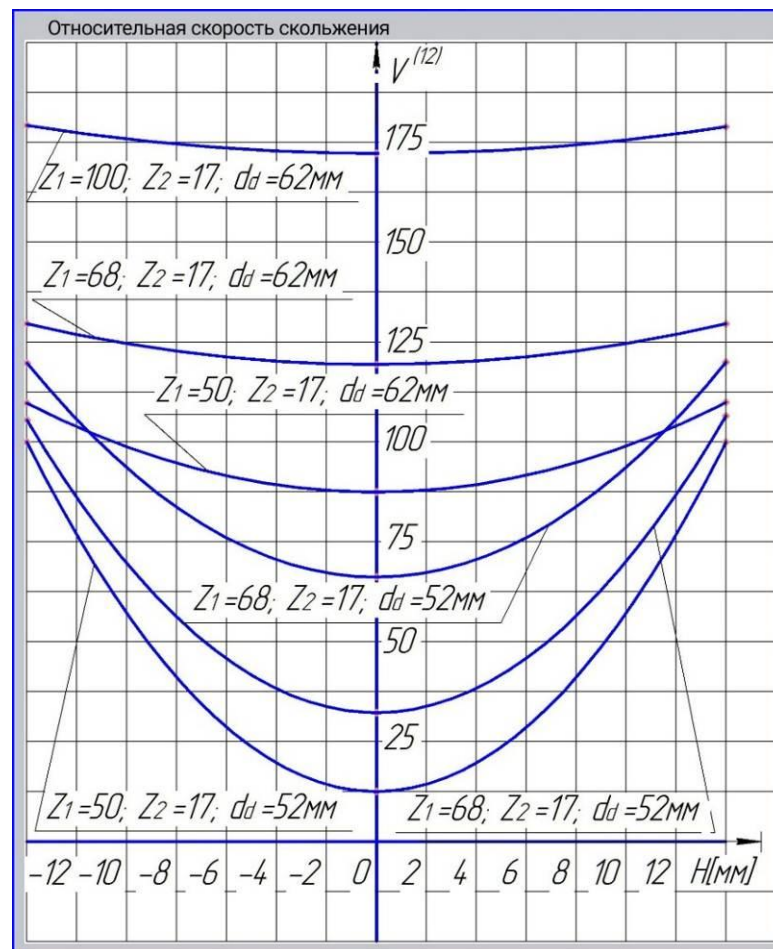


Рис. 4.2. Відносна швидкість ковзання

За допомогою програмного забезпечення «SCOT» призначеного для синтезу контактних точок спряжених поверхонь [237] були отримані контактуючі поверхні та проведений аналіз відносної швидкості ковзання [63].

Візуалізація результатів відносної швидкості ковзання представлена на рис. 4.3.

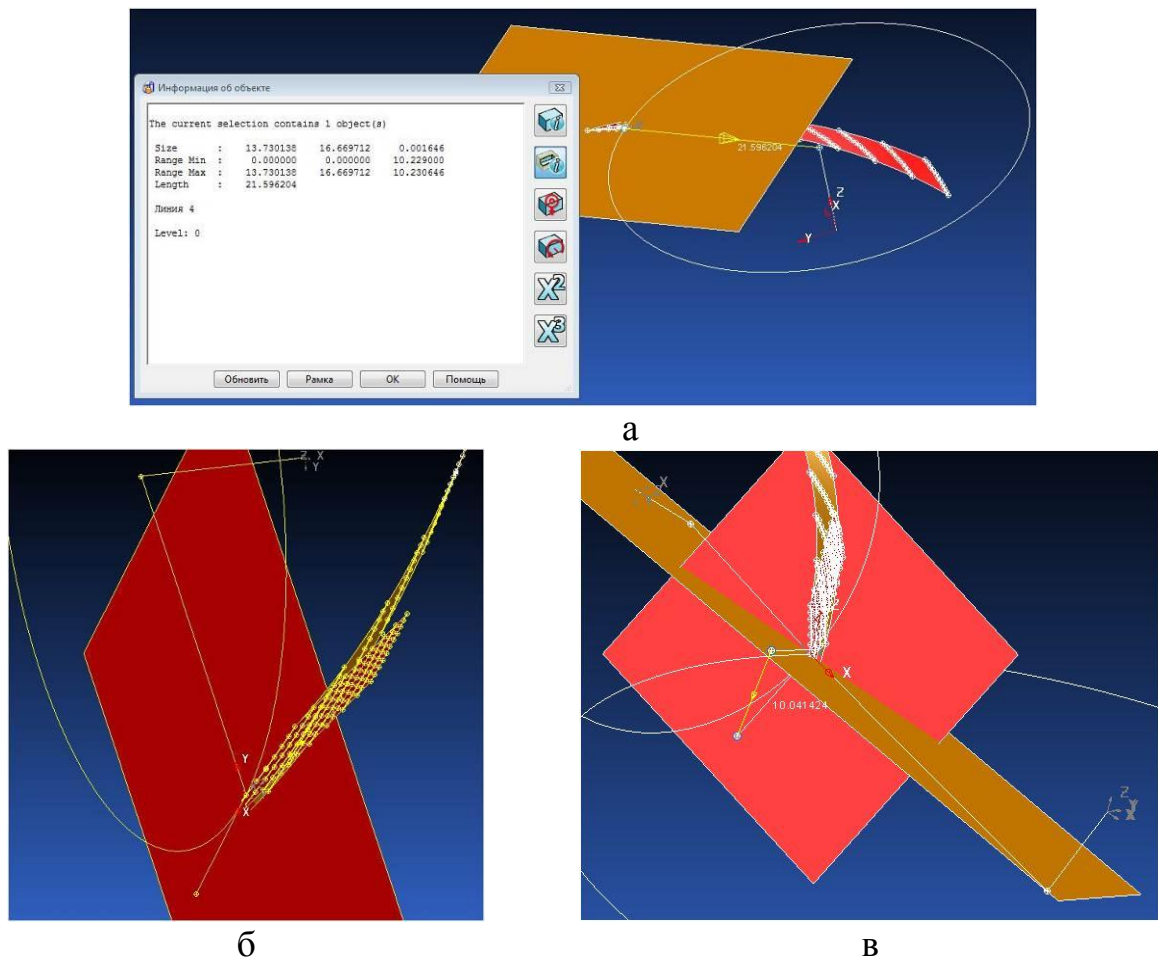


Рис. 4.3. Візуалізація результатів відносної швидкості ковзання: побудова векторів швидкості точки контакту на інструменті (а) і зубчастому колесі (б); в – побудова вектору відносної швидкості

Для побудови відносної швидкості будуюмо в системах координат колеса та інструменту допоміжні площини через точку контакту, перпендикулярно до осей обертання, відповідно, колеса та інструменту, будуюмо в них кола та в точці контакту відкладаємо відрізки по дотичній до допоміжних колах довжиною, що дорівнює значенню швидкості точки

контакту (рис. 4.3,а, рис. 4.3,б). Поєднуючи кінці цих відрізків, отримуємо вектор відносної швидкості (рис. 4.3,в), який буде лежати в площині, паралельній дотичній площині до поверхні зубців.

4.2. Аналіз кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній

Формоутворення зубчастих коліс багато в чому залежить від кута між вектором відносної швидкості ковзання і лініями контакту при фіксованому куті повороту φ_1 циліндричного зубчастого колеса. Чим більше кут β , тим менше кут між вектором відносної швидкості та напрямком лінії контакту.

Кут між вектором відносної швидкості $\vec{V}^{(12)}$ та вектором $\vec{\tau}_1$ – дотичним до лінії контакту визначимо з наступного рівняння [16], [45], [97], [155]:

$$\operatorname{tg} \nu_{\tau} = \left| [\vec{\tau}_1 \times \vec{V}^{(12)}] \right| / (\vec{\tau}_1, \vec{V}^{(12)}) \quad (4.3)$$

де $\vec{\tau}_1$ – вектор дотичної до контактної лінії.

Маючи на увазі, що вектор $\vec{\tau}_1$ лежить у дотичній до різальної кромки площині, представимо його у вигляді лінійної комбінації векторів \vec{r}_1^{λ} та \vec{r}_1^{μ} , розташованих в тій самій дотичній площині, тоді $\vec{\tau}_1$ запишемо в такому виді:

$$\vec{\tau}_1 = \vec{r}_1^{\lambda} F^{\mu} - \vec{r}_1^{\mu} F^{\lambda} \quad (4.4)$$

Розкриваючи векторний вираз (4.3) з урахуванням рівняння (4.4), отримаємо

$$tg v_{\tau} = \left| \left[a(\vec{r}_1^{\lambda} \times \vec{V}^{(12)}) + b(\vec{r}_1^{\mu} \times \vec{V}^{(12)}) \right] \right| / \left[a(\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)}) + b(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)}) \right] \quad (4.5)$$

Перетворюючи вирази (4.5) та розклавши вектор відносної швидкості $\vec{V}^{(12)}$ за напрямками \vec{r}_1^{λ} та \vec{r}_1^{μ} , отримаємо:

$$\vec{V}^{(12)} = a \vec{r}_1^{\lambda} + b \vec{r}_1^{\mu} \quad (4.6)$$

де

$$a = \frac{1}{E_1 G_1 - F_1^2} \begin{vmatrix} (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\lambda}) & F_1 \\ (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\mu}) & G_1 \end{vmatrix}, \quad b = \frac{1}{E_1 G_1 - F_1^2} \begin{vmatrix} E_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\lambda}) \\ F_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\mu}) \end{vmatrix}$$

З виразів (4.5) та (4.6) слідує:

$$tg v_{\tau} = (ab^* - a^*b) |N| / [a(\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)}) + b(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)})] \quad (4.7)$$

Тоді кут між векторами \vec{r}_1 та $\vec{V}^{(12)}$ визначається рівнянням [254]:

$$tg v_{\tau} = -F^{\mu} [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\mu}) E_1 - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\lambda}) F_1] - F^{\lambda} [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\lambda}) G_1 - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^{\mu}) F_1] / [(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)}) F^{\lambda} - (\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)}) F^{\mu}] |N| \quad (4.8)$$

Використовуючи вираз (3.41), перепишемо вираз (4.8) в такому виді [49]:

$$\begin{aligned}
tg \nu_{\tau} = & -[F^{\mu}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)}) - \\
& - F^{\lambda}(\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)})]/[(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)})F^{\lambda} - \\
& - (\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)})F^{\mu}] \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}
\end{aligned} \quad (4.9)$$

Кут ν_{τ} між вектором відносної швидкості $\vec{V}^{(12)}$ та лінією контакту $\vec{\tau}_1$ дорівнює $0,5\pi$ в точках для яких дільник виразу (4.9) дорівнює нулю, тобто,

$$(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)})F^{\lambda} - (\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)})F^{\mu} = 0 \quad (4.10)$$

Цю умову можна використовувати для виключення рівних кутів між вектором відносної швидкості і лінією контакту, коли різання буде найсприятливішим. І навпаки, вираз (4.10) можна використовувати при синтезі гіперболоїдної передачі по найбільш вигідному значенню кута між вектором відносної швидкості та лінією контакту.

При

$$-[F^{\mu}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)(\vec{r}_1^{\mu} \vec{V}^{(12)}) - F^{\lambda}(\vec{r}_1^{\lambda} \vec{V}^{(12)})] = 0, \quad (4.11)$$

кут $\nu_0 = 0$. Цей вираз показує найсприятливіші умови роботи зубців гіперболоїдної передачі.

В роботі виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній при накатуванні зубчастих коліс інструментом з евольвентним профілем [60] та інструментом з профілем, описаним кривою Безьє 3-го порядку, отриманої в результаті апроксимації евольвенти. Результати розрахунків практично збіглися (рис. 4.4).

За допомогою програмного забезпечення «SCOT», призначеного для синтезу контактних точок складних поверхонь [237], були отримані контактуючі поверхні та проведений аналіз кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній [63]. Візуалізація результатів аналізу кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній представлена на рис. 4.5.

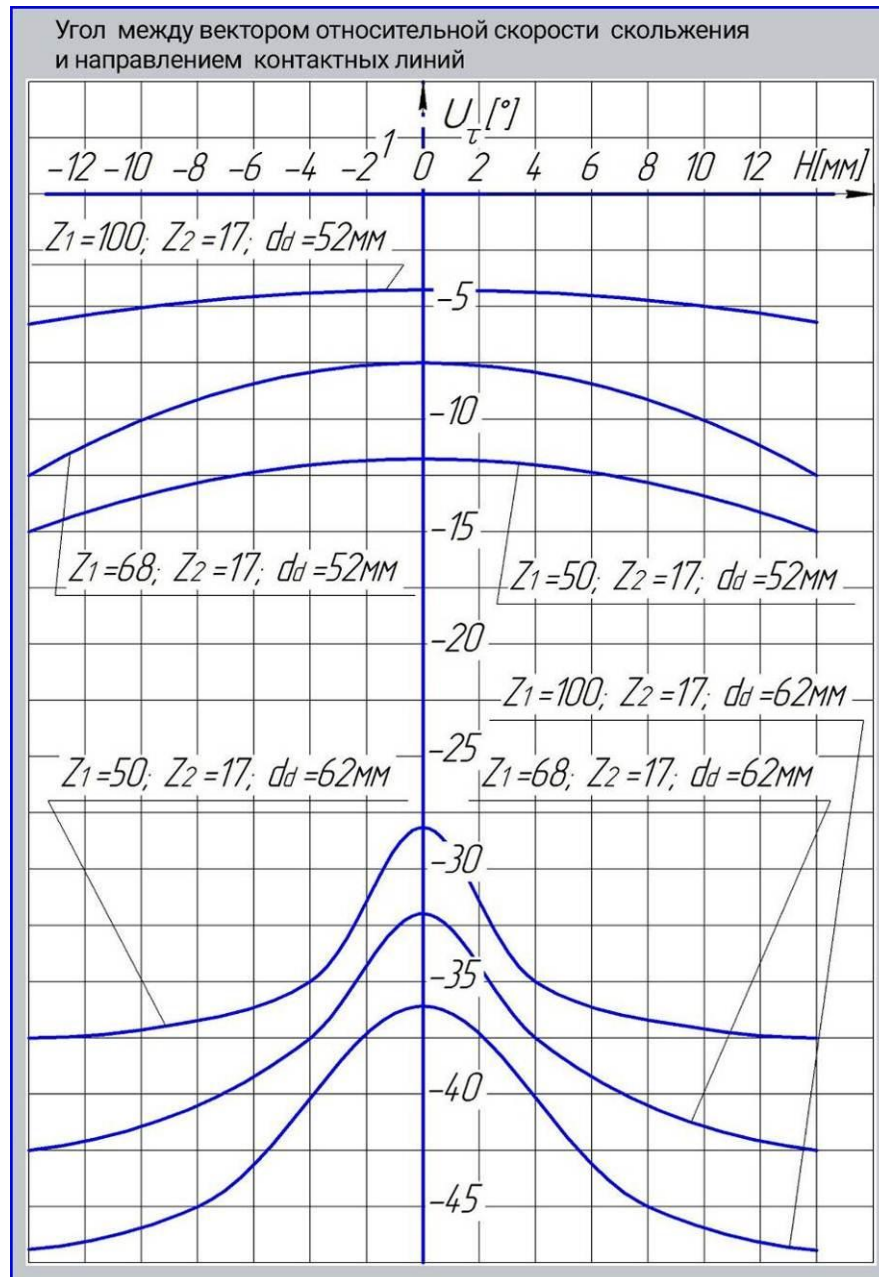


Рис. 4.4. Кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній

Для аналізу необхідно провести січну площину через відрізок, що характеризує відносну швидкість і через точку контакту (рис. 4.5,а). Між лінією перетину цієї площини з поверхнею зуба та лінією контакту можна інтерактивно аналізувати кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній в точці контакту (рис. 4.5,б).

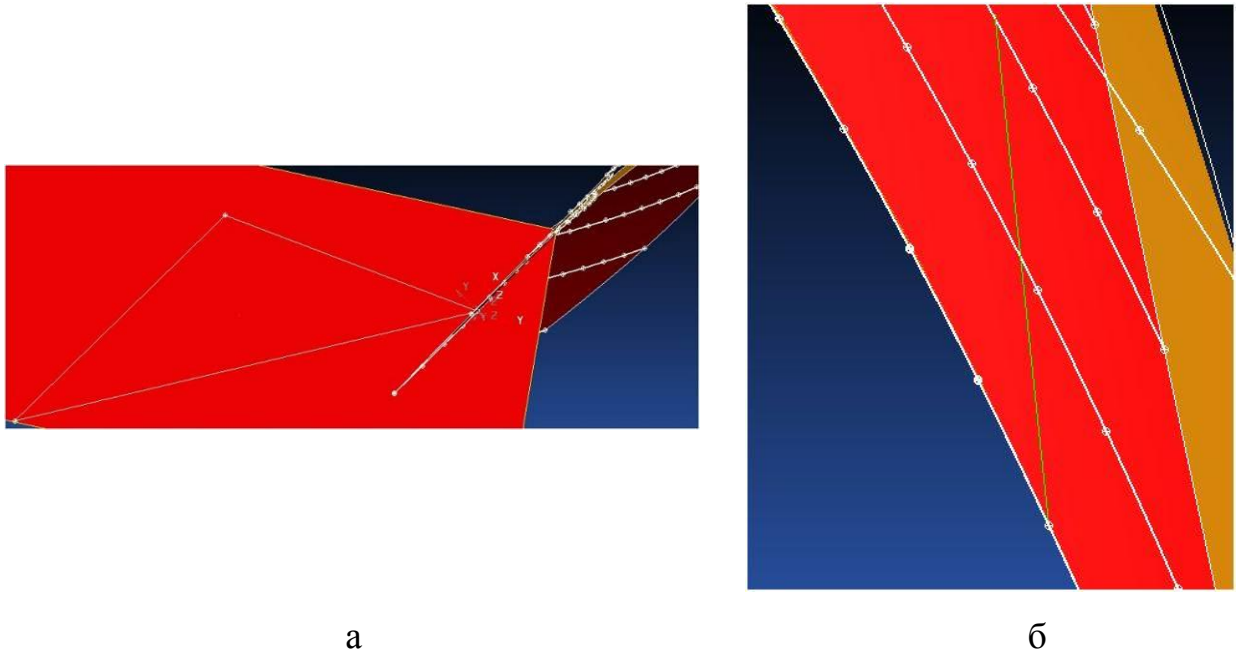


Рис. 4.5. Візуалізація результатів аналізу кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній:

- а – побудова проекції вектору відносної швидкості на поверхню зуба;
 б – візуалізація кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній

4.3. Аналіз сумарної швидкості переміщення точок контакту поверхонь, що беруть участь у процесі формоутворення

Швидкість переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту істотно впливає на формоутворення зубчастих коліс. Введемо наступні позначення:

$\vec{V}^{(1)}$ – вектор швидкості точки при русі по основній поверхні зуба циліндричного колеса;

$\vec{V}^{(2)}$ – вектор швидкості точки основної поверхні гіперболоїдного інструменту;

$\vec{V}^{(12)}$ – вектор швидкості відносного ковзання, який впливає на зношування спряжених поверхонь.

Між наведеними швидкостями контактних точок існує такий зв'язок [18], [43], [101], [103], [155]:

$$\vec{V}^{(2)} - \vec{V}^{(1)} = \vec{V}^{(12)} \Rightarrow \vec{V}^{(2)} = \vec{V}^{(1)} + \vec{V}^{(12)} \quad (4.12)$$

Швидкість руху точки контакту по поверхні зубців циліндричного колеса в рухомій системі координат $x_I y_I z_I$ (рис. 3.3) можна отримати, диференціюючи рівняння (3.14) по часу t :

$$\vec{V}^{(1)} = \bar{r}_1^\lambda d\lambda/dt + \bar{r}_1^\mu d\mu/dt \quad (4.13)$$

де $\bar{r}_1^\lambda, \bar{r}_1^\mu$ – часткові похідні вектору $\vec{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$ по λ та μ відповідно.

Нехай в системі координат $x_I y_I z_I$ заданий одиничний вектор \vec{q} . Визначимо швидкість переміщення точки контакту в напрямку, перпендикулярному цьому вектору. Скалярно помноживши рівність (4.13) на вектор \vec{q} отримаємо:

$$(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) d\lambda/dt + (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) d\mu/dt = 0 \quad (4.14)$$

Додамо до цієї рівності співвідношення, що отримується при диференціюванні рівняння верстатного зачеплення (3.51).

$$F^\lambda d\lambda/dt + F^\mu d\mu/dt + F^{\varphi 1} d\varphi_1/dt = 0 \quad (4.15)$$

У співвідношеннях (4.14) та (4.15) три невідомих $d\lambda/dt$, $d\mu/dt$, $d\phi_1/dt$. Одним з невідомих задаємося, поклавши, наприклад, $d\phi_1/dt=1$. Решту невідомих визначимо, вирішивши систему рівнянь (4.14) і (4.15). Рішення цих рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned} d\lambda/dt &= (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^{\phi 1} / [(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^\lambda]; \\ d\mu/dt &= -(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^{\phi 1} / [(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^\lambda] \end{aligned} \quad (4.16)$$

З виразів (4.13) та (4.16) слідує

$$\vec{V}^{(1)} = F^{\phi 1} / [(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^\lambda] [\bar{r}_1^\lambda (\bar{r}_1^\lambda (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) - \bar{r}_1^\mu (\bar{r}_1^\lambda \bar{q}))]. \quad (4.17)$$

Вирази другого множника рівності (4.17) перетворимо до наступного вигляду

$$[\bar{r}_1^\lambda (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) - \bar{r}_1^\mu (\bar{r}_1^\lambda \bar{q})] = |\vec{N}| [\vec{q} \times \vec{l}_1]$$

де $|\vec{N}|$ – модуль вектору нормалі до поверхні зуба циліндричного колеса;

\vec{l}_1 – одиничний вектор нормалі цієї поверхні (проекції цього вектору визначаються рівністю (3.42)).

З урахуванням цієї рівності отримуємо

$$\vec{V}^{(1)} = F^{\phi 1} [\vec{q} \times \vec{l}_1] |\vec{N}| / [(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^\lambda] \quad (4.18)$$

$$\vec{V}^{(2)} = F^{\phi 1} [\vec{q} \times \vec{l}_1] |\vec{N}| / [(\bar{r}_1^\lambda \bar{q}) F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q}) F^\lambda] + \vec{V}^{(12)}$$

При дослідженні питомих ковзань передач виникає необхідність визначення швидкості руху точок контакту в напрямку заданого вектора. Визначимо цю швидкість. Нехай заданий одиничний вектор \vec{a} ,

перпендикулярний \vec{q} . Необхідно визначити $\vec{V}^{(12)} \neq 0$ в напрямку заданого вектора. У даному випадку вектор \vec{q} , що входить у співвідношення (4.18), дорівнює

$$\vec{q} = [\vec{a} \times \vec{l}_1] = [\vec{a} \times (\vec{r}_1^\lambda \times \vec{r}_1^\mu)] / |\vec{N}| \quad (4.19)$$

Розкриваючи подвійний векторний добуток, маємо:

$$q = [\vec{r}_1^\lambda (\vec{a} \vec{r}_1^\mu) - \vec{r}_1^\mu (\vec{a} \vec{r}_1^\lambda)] / |\vec{N}|$$

З урахуванням цієї рівності отримуємо

$$\begin{aligned} |\vec{N}| [\vec{q} \times \vec{l}_1] &= -[\vec{r}_1^\lambda (\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 + \vec{r}_1^\mu (\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1] |\vec{N}| \\ (\vec{r}_1^\lambda q) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu q) F^\lambda &= [(\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1 F^\mu + (\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 F^\lambda] |\vec{N}| \end{aligned}$$

де E_1, G_1 – коефіцієнти першої квадратичної форми поверхонь контактуючих зубців.

Після чого співвідношення (4.18) можна привести до виду

$$\begin{aligned} \vec{V}^{(1)} &= -[(\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 \vec{r}_1^\lambda + (\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1 \vec{r}_1^\mu] F^{\phi 1} / [(\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1 F^\mu + (\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 F^\lambda], \\ \vec{V}^{(2)} &= -[(\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 \vec{r}_1^\lambda + (\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1 \vec{r}_1^\mu] \cdot F^{\phi 1} / [(\vec{a} \vec{r}_1^\mu) E_1 F^\mu + (\vec{a} \vec{r}_1^\lambda) G_1 F^\lambda] + \vec{V}^{(12)} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Визначимо сумарну швидкість руху точок контакту в напрямку, перпендикулярному вектору \vec{q} . Для цього скористаємося співвідношеннями (4.18). Згідно з цими співвідношеннями вектор сумарної швидкості переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному до одиничного вектора \vec{q} , дорівнює [43]:

$$\vec{u} = \vec{V}^{(1)} + \vec{V}^{(2)} = 2F^{\varphi 1} [\vec{q} \times \vec{l}_1] |N| / [(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda] + \vec{V}^{(12)} \quad (4.21)$$

Для знаходження істинного значення швидкості знайдемо проекцію вектора \vec{u} на одиничний вектор, перпендикулярний вектору \vec{q} .

$$\vec{\bar{q}} = [\vec{q} \times \vec{l}_1] \quad (4.22)$$

Помноживши скалярно обидві частини рівності (4.21) на вектор (4.22), після перетворень маємо:

$$\vec{u}_{\vec{q}} = 2F^{\varphi 1} + \vec{V}^{(12)} [\vec{q} \times \vec{l}_1] (\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda / [(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda] \quad (4.23)$$

Залежність (4.23) визначає сумарну швидкість руху точок контакту в довільному напрямку, який визначається одиничним вектором \vec{q} . Попутно визначимо сумарну швидкість точок контакту в напрямку вектора \vec{a} під кутом ψ до вектора $\vec{\tau}_1$ – дотичного контактній лінії основних поверхонь кінематичної пари. Уявімо вектор \vec{a} у виді

$$\vec{a} = (\vec{r}_1^\lambda \frac{d\lambda}{d\mu} + \vec{r}_1^\mu) / \sqrt{E_1 (\frac{d\lambda}{d\mu})^2 + G_1}. \quad (4.24)$$

Кут між векторами \vec{a} і $\vec{\tau}_1$ можна визначити із співвідношення [97], [179]

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{|[\vec{\tau} \times \vec{a}]|}{(\vec{\tau}_1, \vec{a})} \quad (4.25)$$

Перетворюючи праву частину цієї рівності з використанням

співвідношення (4.24) і маючи на увазі, що $\bar{\tau}_1 = \bar{r}_1^\lambda F^\mu - \bar{r}_1^\mu F^\lambda$, отримаємо

$$\operatorname{tg} \psi = |\bar{N}| (F_1^\lambda \frac{d\lambda}{d\mu} + F^\mu) / (E_1 F^\mu \frac{d\lambda}{d\mu} - G_1 F^\lambda).$$

Вирішуючи останнє рівняння щодо $d\lambda/d\mu$, отримаємо

$$d\lambda/d\mu = -(G_1 F^\lambda \operatorname{tg} \psi + |\bar{N}| F^\mu) / (|\bar{N}| F^\lambda - E_1 F^\mu \operatorname{tg} \psi) \quad (4.26)$$

Співвідношення (4.26) можна використовувати при довільному значенні кута ψ . Так, наприклад, при $\psi = 0$ отримаємо $d\lambda/d\mu = -F^\mu / F^\lambda$, що відповідає напрямку вектора $\bar{\tau}_1$. В цьому випадку вектор \bar{a} направлений вздовж вектора $\bar{\tau}_1$. Підставивши (4.26) в рівність (4.24), після перетворень, маємо

$$\bar{a} = a \bar{r}_1^\lambda + b \bar{r}_1^\mu, \quad (4.27)$$

де коефіцієнти a та b визначаються рівняннями

$$\begin{aligned} a &= -(G_1 F^\lambda \operatorname{tg} \psi + |\bar{N}| F^\mu) a_w, \\ b &= (|\bar{N}| F^\lambda - E_1 F^\mu \operatorname{tg} \psi) a_w \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$a_w = [(E_1 G_1 F^\lambda \operatorname{tg} \psi + |\bar{N}| F^\mu)^2 + (G_1 F^\lambda |\bar{N}| - E_1 G_1 F^\mu \operatorname{tg} \psi)^2]^{1/2} \quad (4.29)$$

Зі співвідношень (4.22) при заміні вектору \bar{q} вектором \bar{a} після перетворень залежності (4.23), отримуємо

$$u_{\bar{a}} = \frac{2F^{\varphi 1} + [bG_1(\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)} - aE_1(\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})] \cdot [(\bar{r}_1^\lambda q)F^\mu - (\bar{r}_1^\lambda q)F^\lambda] / E_1 G_1}{[(\bar{r}_1^\lambda \bar{q})F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q})F^\lambda] / |\bar{N}|} \quad (4.30)$$

Вважаючи в співвідношеннях (4.28) і (4.30) $\psi = 0$, маємо наступну формулу для визначення сумарної швидкості руху точок контакту в напрямку, перпендикулярному вектору \bar{r}_1 .

$$u_{\bar{r}} = \frac{2F^{\varphi 1} + [G_1 F^\lambda (\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) + E_1 F^\mu (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})] \cdot \frac{[\bar{r}_1^\lambda \bar{q})F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q})F^\lambda}{A_1 E_1 G_1}}{[(\bar{r}_1^\lambda \bar{q})F^\mu - (\bar{r}_1^\mu \bar{q})F^\lambda] / |N|} \quad (4.31)$$

де $A_1 = \sqrt{E_1 (F^\mu)^2 + G_1 (F^\lambda)^2}$ – модуль вектору;

E_1, G_1 – коефіцієнти квадратичних форм основної поверхні, що дорівнюють [97]

$$E_1 = (f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2; \quad F_1 = 0; \quad G_1 = 0$$

$F^{\varphi 1}, F^\mu, F^\lambda$ – частинні похідні, знаходимо з рівняння верстатного зачеплення (3.51):

$$\begin{aligned} F^{\varphi 1} &= -\mu u_{21} \sin \gamma (-f_2'(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_1) - \\ &\quad - a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1); \\ F^\lambda &= -(1 - u_{21} \cos \gamma) [(f_2'(\lambda, P_y))^2 + f_2(\lambda, P_y) f_2''(\lambda, P_y) + \\ &\quad + f_1''(\lambda, P_x) (f_1(\lambda, P_x) - r_1) + (f_1'(\lambda, P_x))^2] - \mu u_{21} \sin \gamma (f_2''(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + \\ &\quad + f_1''(\lambda, P_x) \sin \varphi_1 - a_w u_{21} \cos \gamma (f_2''(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 - f_1''(\lambda, P_x) \cos \varphi_1); \\ F^\mu &= -u_{21} \sin \gamma (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1) \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\bar{\tau}^0 = \bar{q} = \frac{\bar{r}_1^\lambda F^\mu - \bar{r}_1^\mu F^\lambda}{a_w} - \text{одиничний вектор дотичної до контактної}$$

лінії.

Підставляючи вектор \bar{q} у (4.31) та враховуючи (4.32), отримуємо:

$$u_{\bar{\tau}} = \frac{2F^{\phi 1} E_1 + F^\mu (\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) - F^\mu E_1 (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})}{\sqrt{E_1 [(F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2]}} = \quad (4.33)$$

$$= \frac{2F^{\phi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - F^\lambda (\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) - ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^\mu (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})}{\sqrt{((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) [(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 (F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2]}}$$

де $(\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}), (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)})$ – визначимо з виразів (2.16) та (3.14).

Отримуємо:

$$(\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) = [-f_1'(\lambda, P_x) f_2(\lambda, P_y) + f_2'(\lambda, P_y) (f_1(\lambda, P_x) - r_1)] (1 - u_{21} \cos \gamma) -$$

$$- \mu u_{21} \sin \gamma (f_1'(\lambda, P_x) \cos \phi_1 - f_2'(\lambda, P_y) \sin \phi_1) -$$

$$- a_w u_{21} \cos \gamma (f_1'(\lambda, P_x) \sin \phi_1 + f_2'(\lambda, P_y) \cos \phi_1);$$

$$(\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)}) = [(f_1(\lambda, P_x) - r_1) \cos \phi_1 - f_2(\lambda, P_y) \sin \phi_1 + a_w \mu u_{21} \sin \gamma$$

При

$$2F^{\phi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - F^\lambda (\bar{r}_1^\lambda \bar{V}^{(12)}) -$$

$$- ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^\mu (\bar{r}_1^\mu \bar{V}^{(12)}) = 0 \quad (4.35)$$

найгірші умови для роботи циліндрично-гіперболоїдної передачі для точок контакту, для яких $u_{\bar{\tau}} = 0$.

В роботі виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку сумарної швидкості переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту при накатуванні зубчастих коліс інструментом з евольвентним профілем витків [60] та інструментом з

профілем, описаним кривою Безьє 3-го порядку, отриманою в результаті апроксимації евольвенти. Результати розрахунків практично збіглися (рис. 4.6).

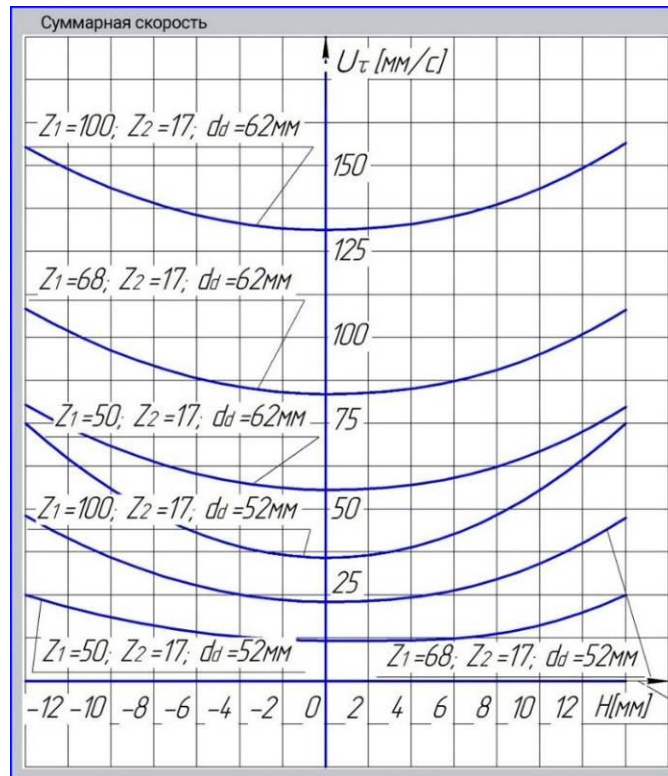
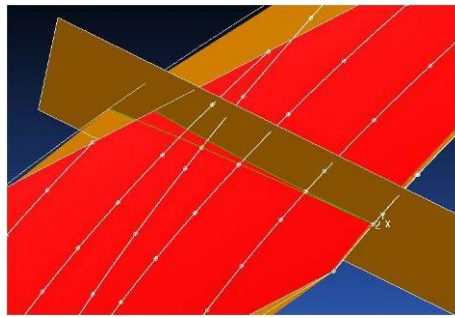


Рис. 4.6. Сумарна швидкість переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту

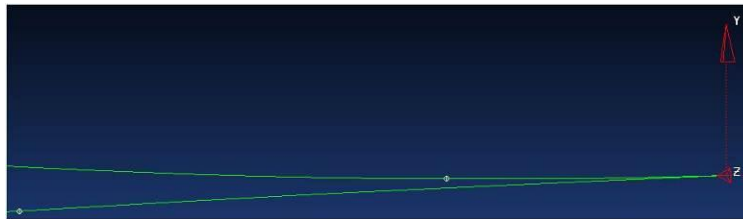
За допомогою програмного забезпечення «SCOT», призначеного для синтезу контактних точок складних поверхонь [237], були отримані поверхні, що контактують та проведений аналіз сумарної швидкості переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту [63].

Візуалізація результатів аналізу сумарної швидкості переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту представлений на рис. 4.7.

На рис. 4.7,а показано побудову лінії перетину поверхонь зубців нормальної площиною, перенесення їх у вільне місце (рис. 4.7,б), визначення довжини шляху точки контакту від однієї контактної лінії до іншої для колеса (рис. 4.7,в) та інструменту (рис. 4.7,г) за один і той самий час.



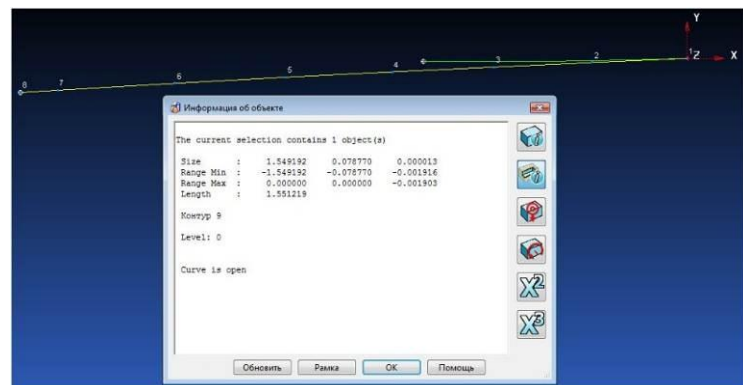
а



б



в



г

Рис. 4.7. Візуалізація результатів аналізу сумарної швидкості переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту: а – побудова лінії перетину поверхонь зубців нормальній площиною; б – перенесення ліній перетину у вільне місце; визначення довжини шляху точки контакту від однієї контактної лінії до іншої для колеса (в) та інструменту (г) за один і той самий час

Подальше визначення сумарної швидкості переміщення точок контакту не є складним.

4.4. Коефіцієнти питомих ковзань

За величиною відносної швидкості ковзання пари спряжених поверхонь складно судити про величину проковзування функціональних поверхонь. З теорії зачеплення відомо, що оцінка зношування зубців (витків) тільки за швидкістю ковзання не є об'єктивною. Тому для оцінки зношування зубців розглянутої пари зубчасте колесо–інструмент, і, отже, їх довговічності будемо використовувати коефіцієнти питомих ковзань [43], [101]. Ці коефіцієнти виразимо наступним чином, відповідно на зубцях коліс передачі [99], [103]

$$\eta_1 = V^{(12)} / V^{(1)}; \quad \eta_2 = V^{(12)} / V^{(2)} \quad (4.36)$$

де $V^{(12)}$ – модуль швидкості ковзання контактуючих зубців колеса та гіперболоїдного інструменту;

$V^{(1)}$, $V^{(2)}$ – швидкості переміщення точки контакту по боковій поверхні контактуючих спряжених поверхонь в напрямку вектора відносної швидкості ковзання $\vec{V}^{(12)}$. Швидкості руху точок контакту $\vec{V}^{(1)}$, $\vec{V}^{(2)}$ по оброблюваної і огибаючій поверхнях в напрямку вектора $\vec{V}^{(12)}$ можна визначити за формулами (4.17) і (4.18), якщо у них замість вектора \vec{q} підставити вектор $\vec{V}^{(12)}$.

З використанням виразів (4.13), (4.18) коефіцієнти питомих ковзань можна записати в такому виді:

$$\eta_1 = [\vec{V}^{(12)}]^2 / (\vec{V}^{(1)} \vec{V}^{(12)}); \quad \eta_2 = [\vec{V}^{(12)}]^2 / (\vec{V}^{(2)} \vec{V}^{(12)}) \quad (4.37)$$

Підставляючи у формули (4.37) значення $\vec{V}^{(1)}$ і $\vec{V}^{(2)}$ з формул (4.17), (4.18), після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \{[(\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)E_1 - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)F_1]F^\mu - [(\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)F_1 - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)G_1]\}F^\lambda / F^{\varphi 1}(E_1G_1 - F_1^2) \\ \eta_2 &= 1 + F^{\varphi 1}(E_1G_1 - F_1^2) / \{F^{\varphi 1}(E_1G_1 - F_1^2) - [(\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)E_1 - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)F_1]F^\mu - \\ &\quad - [(\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)F_1 - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)G_1]F^\lambda\}\end{aligned}\quad (4.38)$$

З отриманих виразів (4.38) з урахуванням рівнянь (4.19) отримуємо:

$$\eta_1 = \frac{-[(\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)F^\mu + (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)F^\lambda]}{F^{\varphi 1}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)} \quad (4.39)$$

$$\eta_2 = \frac{1 - F^{\varphi 1}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)}{[F^{\varphi 1}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)F^\mu - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)F^\lambda]} \quad (4.40)$$

Якщо чисельник у виразі (4.39) не дорівнює нулю, то точки контакту з нескінченим значенням питомого ковзання η_1 визначають з умови: $F^{\varphi 1} = 0$. При $F^{\varphi 1} \neq 0$ коефіцієнт питомого ковзання η_2 має значення, рівні нескінченності за умови

$$\begin{aligned}F^{\varphi 1}((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu)((f_1'(\lambda, P_x))^2 + \\ + (f_2'(\lambda, P_y))^2)F^\mu - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda)F^\lambda = 0\end{aligned}\quad (4.41)$$

Умови (4.40), (4.41) можна використовувати для визначення точок контакту з нескінченими питомими ковзаннями і таким чином судити про спрацювання зубців коліс та інструментів.

Порівняльний аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів питомих

ковзань при накатуванні зубчастих коліс інструментом з евольвентним профілем витків [60] та інструментом з профілем, описаним кривою Безьє 3-го порядку, отриманою в результаті апроксимації евольвенти показав, що результати практично збігаються (рис. 4.8).

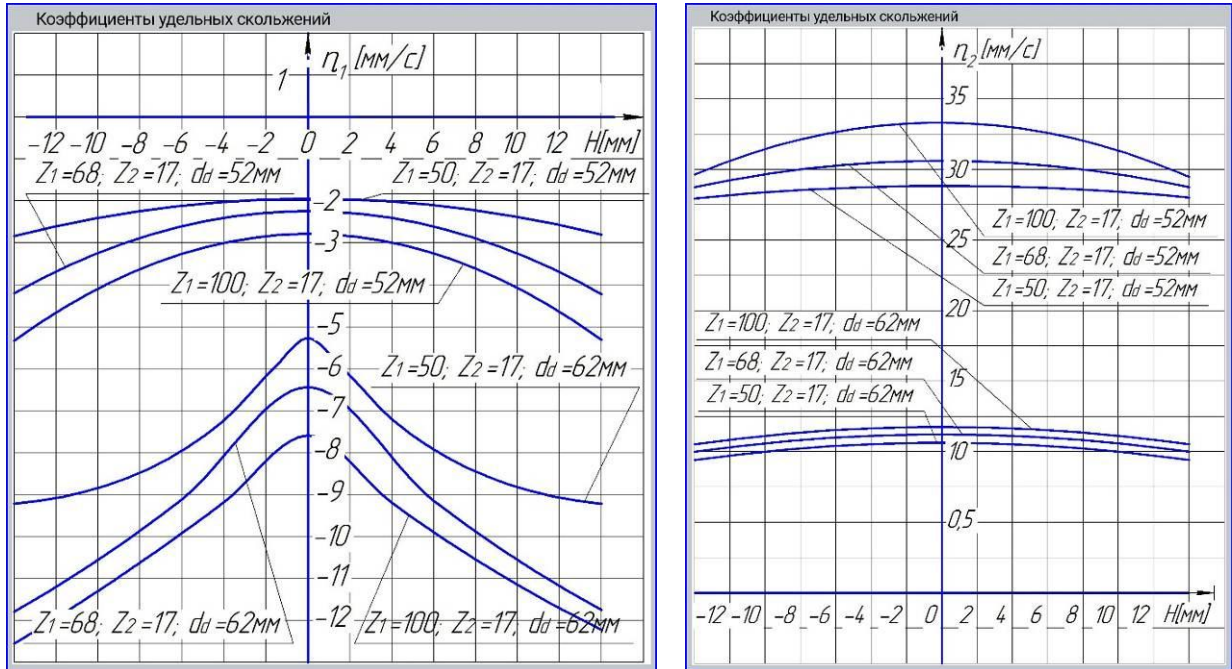


Рис. 4.8. Коефіцієнти питомих ковзань

4.5. Приведена кривизна в перпендикулярному до лінії контакту напрямку

Сили різання, пластичну деформацію, навантажувальну здатність функціональних поверхонь зубців зубчастих коліс в процесі їх експлуатації значною мірою визначає приведена кривизна спряжених поверхонь зубців в напрямку, перпендикулярному до лінії контакту [37], [43], [104], [108], [133], [139], [143], [160], [163], [169], [196], [255].

Під приведеною нормальною кривизною χ_{np} зазвичай розуміють різницю кривизн поверхонь в загальному нормальному перерізі [18], [133], [143], [144], [163], [177].

$$\chi_{np} = \chi^{(1)} - \chi^{(2)} \quad (4.42)$$

де $\chi^{(1)}, \chi^{(2)}$ – нормальні кривизни огинаючої і огинаємої поверхонь в загальному нормальному перерізі.

Для визначення приведеної кривизни поверхонь сполучених зубців застосуємо вираз з теорії зачеплень [179], [255]

$$\chi_{np} = E_1(F^\mu)^2 - 2F_1F^\lambda F^\mu + G(F^\lambda)^2 / \Delta_1 \sqrt{E_1G_1 - F_1}, \quad (4.43)$$

де E_1, G_1, F_1 – коефіцієнти першої квадратичної форми, що визначаються виразами (3.46);

F^μ, F^λ – частинні похідні, що визначаються виразами (4.32).

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 & F_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) \\ F_1 & G_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) \\ F^\lambda & F^\mu & F^{\phi 1} \end{vmatrix}$$

Розкриваючи визначник і з огляду на співвідношення (4.32), (4.34) для даного верстатного зачеплення, отримуємо [154], [158]:

$$\begin{aligned} \chi_{np} = & \frac{1}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}} \times \\ & \times \frac{-[((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)(F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2]}{((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)F^{\phi 1} - F^\lambda (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) - F^\mu ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)})} \end{aligned} \quad (4.44)$$

З виразу (4.44) випливає, що поверхневого контакту в робочому і верстатному зачепленні не може бути. Це пояснюється тим, що чисельник виразу (4.44) ніколи не перетворюється в нуль. Якщо ж знаменник виразу (4.44) дорівнює нулю, то наведена кривизна буде дорівнює нескінченності. У

розглянутих точках з такими значеннями наведеної кривизни будуть несприятливі умови взаємодії спряжених поверхонь, оскільки питомі ковзання мають нескінченно великі значення.

Порівняльний аналіз результатів розрахунку приведеної кривизни в напрямку, перпендикулярному до лінії контакту при накатці зубчастих коліс інструментом з евольвентним профілем витків [60] та інструментом з профілем, описаним кривою Безьє 3-го порядку, отриманою в результаті апроксимації евольвенти, дав практично збіжні результати (рис. 4.9).

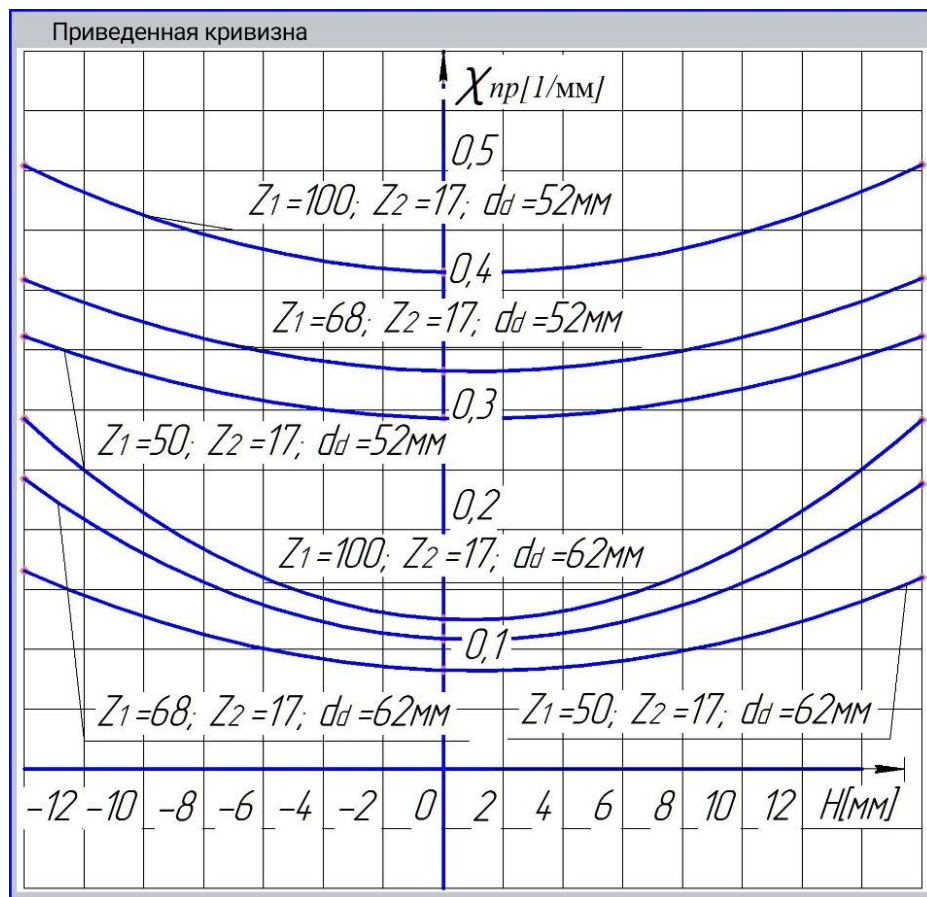


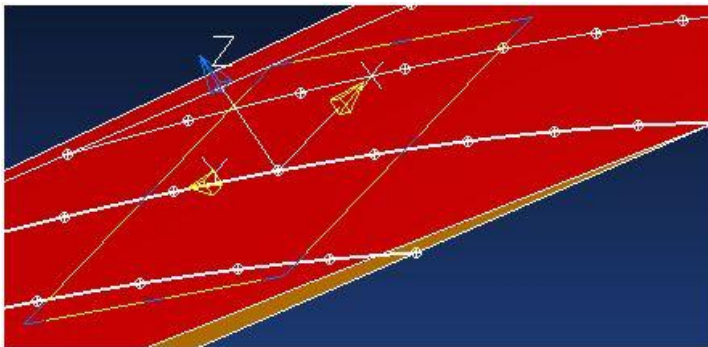
Рис. 4.9. Приведена кривизна в напрямку, перпендикулярному лінії контакту

За допомогою програмного забезпечення «SCOT» призначеного для синтезу контактних точок складних поверхонь [237] були отримані контактуючі поверхні і проведений аналіз приведеної кривизни в напрямку, перпендикулярному до лінії контакту [63].

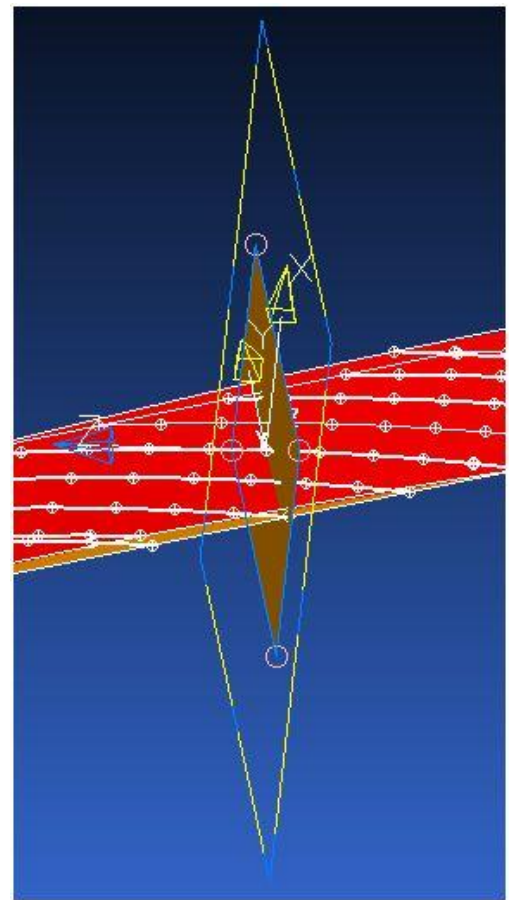
Більшість геометричних та кінематичних показників аналізуються в

напрямку, перпендикулярному лінії контакту. Це перш за все приведена кривизна і сумарна швидкість переміщення точок контакту.

У PowerSHAPE команда «Система координат на поверхні» дозволяє прив'язати репер Френе до контактної точки таким чином, що одна вісь буде спрямована по дотичній до контактної лінії, друга – по головній нормалі в дотичній площині, а третя – по бінормалі (рис. 4.10,а) . У цій системі координат можна побудувати нормальну площину, перпендикулярну до лінії контакту (рис. 4.10,б).

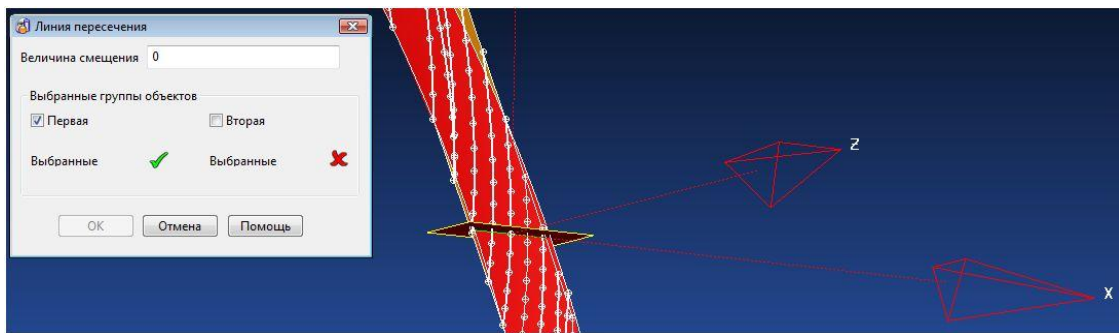


а

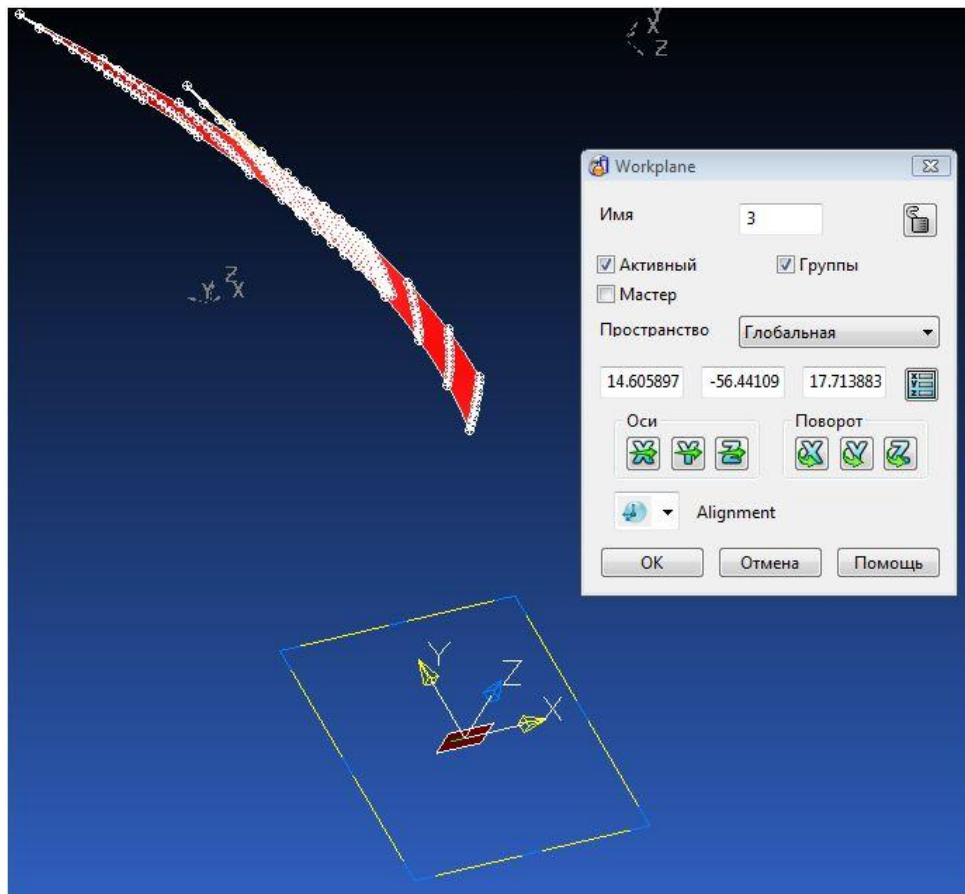


б

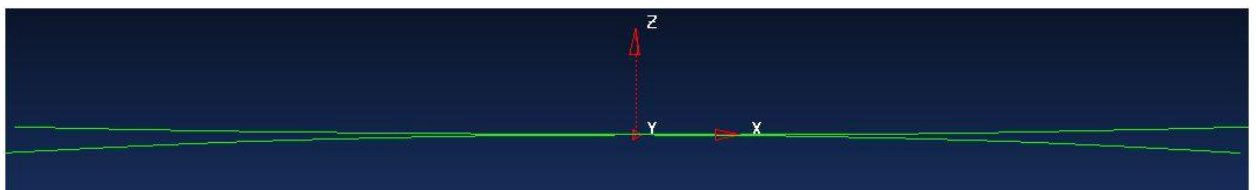
Рис. 4.10. Репер Френе на контактній лінії в середовищі PowerSHAPE:
а – прив'язка репер Френе до контактної точки; б – побудова нормальної площини, перпендикулярної лінії контакту



а



б



в

Рис. 4.11. Аналіз приведеної кривизни в напрямку, перпендикулярному лінії контакту в середовищі PowerSHAPE:

а – побудова ліній перетину; б – переміщення нормальної площини разом з контактними лініями; в – візуалізація приведеної кривизни в точці контакту

Аналіз приведеної кривизни в напрямку, перпендикулярному лінії контакту представлений на рис. 4.11. Команда «Лінія перетину площин» дозволяє будувати лінії перетину нормальної площини та поверхні зубців. На рис. 4.11,а показано побудова ліній перетину. Систему координат (репер Френе) можна перемістити разом зі створеною у ній нормальною площиною і контактними лініями в бік від поверхні (рис. 4.11,б). На рис. 4.11,в показані лінії контакту в площині, перпендикулярній лінії контакту, які дозволяють аналізувати приведену кривизну в точці контакту.

4.6. Геометричні та кінематичні показники замкненої системи

Геометричні і кінематичні показники двопотокової замкненої системи, заснованої на кінематичній схемі формоутворення 2-го класу, аналізуються за допомогою програмного забезпечення «SAIAT», призначеного для комплексного параметричного моделювання і аналізу систем і процесів формоутворення функціональних поверхонь зубчастих коліс та інструментальних поверхонь, що їх утворюють [236]. На рис. 4.12 показаний інтерфейс аналізу геометричних та кінематичних показників дотичних поверхонь для кінематичних схем формоутворення 2-го класу.

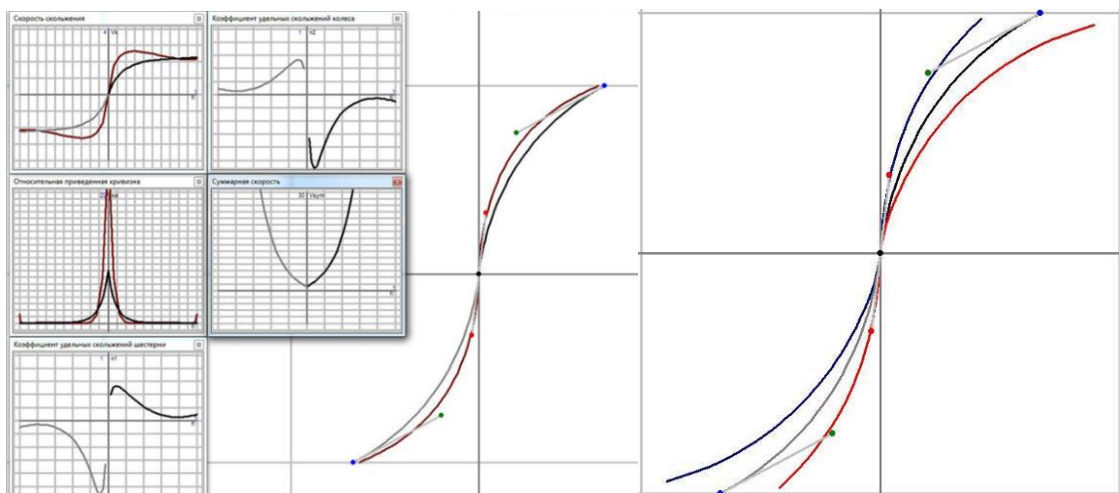


Рис. 4.12. Інтерфейс аналізу геометричних і кінематичних показників в середовищі «SAIAT» [236]

Змінюючи за допомогою керуючих елементів геометрію поверхонь,

можна одночасно інтерактивно оцінювати зміну геометричних і кінематичних показників в точці контакту поверхонь та порівнювати їх значення з початковими [76], [79].

4.6.1. Відносна швидкість ковзання робочих поверхонь

Відносна швидкість ковзання є одним з показників інтенсивності і характеру зносу робочих поверхонь зубців.

У робочому зачепленні відносна швидкість дорівнює [179]

$$\bar{V}^{12} = \bar{V}_r^1 - \bar{V}_r^2, \quad (4.45)$$

де $\bar{V}_r^{(1)}, \bar{V}_r^{(2)}$ – вектори швидкості точки контакту при русі, відповідно, по поверхні шестерні та колеса, які можна визначити з рівняння

$$\bar{V}_r^{(i)} = \bar{V}^{(n)} + \bar{V}^{(ni)}. \quad (4.46)$$

Тут $\bar{V}^{(n)}$ – вектор швидкості точки контакту при русі по твірній поверхні; $\bar{V}^{(ni)}$ – вектор відносної швидкості при зачепленні твірної поверхні з нарізаним колесом.

Підставляючи (4.46) в (4.45), отримуємо:

$$\bar{V}^{(12)} = \bar{V}^{(n1)} - \bar{V}^{(n2)}, \quad (4.47)$$

або, враховуючи (3.78),

$$\bar{V}^{(12)} = (\omega_1 + \omega_2) [\Omega_1 \cos \beta \bar{i} + f(\lambda, P_x) \bar{j}], \quad (4.48)$$

де ω_1, ω_2 – кутові швидкості обертання, відповідно, шестерні і колеса.

У нерухомій системі координат XYZ проекції вектору відносної швидкості

$$\begin{aligned} V_x^{(12)} &= (\omega_1 + \omega_2) \Omega_1 \cos \beta; \\ V_y^{(12)} &= (\omega_1 + \omega_2) f_1(\lambda, P_x); \\ V_z^{(12)} &= 0. \end{aligned} \quad (4.49)$$

Отже, модуль вектору відносної швидкості ковзання робочих поверхонь зубців

$$|\bar{V}^{(12)}| = V^{(12)} = (\omega_1 + \omega_2) \sqrt{\Omega_1^2 \cos^2 \beta + f_1^2(\lambda, P_x)}. \quad (4.50)$$

Після перетворень отримаємо

$$V^{(12)} = (\omega_1 + \omega_2) f_1(\lambda, P_x) \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \alpha \cos^2 \beta + 1} \quad (4.51)$$

Зі співвідношень (4.51) випливає, що, незалежно від виду твірної поверхні, вектор відносної швидкості ковзання лежить в торцевій площині зубчастих передач. Відносна швидкість ковзання дорівнює нулю тільки в полюсі зачеплення. При змінному β відносна швидкість ковзання уздовж зубчастого вінця для передач з паралельними осями – величина змінна.

На рис. 4.13 показано графіки зміни відносної швидкості ковзання для кінематичних схем формоутворення 2-го класу в процесі інтерактивного керування геометрією за допомогою керуючих елементів системи формоутворення [76], [79].



Рис. 4.13. Графіки відносної швидкості ковзання

4.6.2. Сумарна швидкість переміщення точок контакту в перпендикулярному до лінії контакту напрямку

Сумарна швидкість переміщення точок контакту в перпендикулярному до лінії контакту напрямку істотно впливає на утворення масляного клина між контактуючими поверхнями. Чим більше ця швидкість, тим краще умови змащування взаємодіючих поверхонь.

Для визначення сумарної швидкості обчислимо спочатку вектор швидкості $\bar{V}^{(n)}$ при русі точки контакту вздовж твірної поверхні (2.32). З цією метою диференціюємо вираз (2.32) за часом t [36]

$$\bar{V}^{(n)} = \bar{r}_n^\lambda \frac{d\lambda}{dt} + \bar{r}_n^\mu \frac{d\mu}{dt} \quad (4.52)$$

Обидві частини виразу (4.52) помножимо скалярно на одиничний вектор \bar{g} , перпендикулярний вектору \bar{V}^n [261]. Так як $\bar{V}^n \perp \bar{q}$ (а також при умові, що $|\bar{q}|=1$), то $\bar{V}^n \cdot \bar{q} = 0$, або

$$\bar{V}^n \cdot \bar{q} = \left(\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q} \right) \cdot \frac{d\lambda}{dt} + \left(\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q} \right) \cdot \frac{d\mu}{dt} = 0. \quad (4.53)$$

Для визначення невідомих $\frac{d\lambda}{dt}$ та $\frac{d\mu}{dt}$ до рівняння (4.53) додаємо співвідношення, що отримане диференціюванням по t рівняння зачеплення (3.76)

$$F_i^\lambda \frac{d\lambda}{dt} + F_i^\mu \frac{d\mu}{dt} + F_i^\varphi \frac{d\varphi}{dt} = 0. \quad (4.54)$$

Рівняння (4.53) і (4.54) містять три невідомих $\left(\frac{d\lambda}{dt}, \frac{d\mu}{dt} \text{ и } \frac{d\varphi}{dt} \right)$, одне з яких, наприклад $\frac{d\varphi}{dt}$, приймемо рівним $\frac{d\varphi}{dt} = 1$ (1/с). Невідомі, які залишилися, визначимо вирішивши систему рівнянь (4.53) і (4.54), наприклад, за правилом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q} & \bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q} \\ F_i^\lambda & F_i^\mu \end{vmatrix} = \left(\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q} \right) \cdot F_i^\mu - \left(\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q} \right) \cdot F_i^\lambda,$$

$$\Delta_\lambda = \begin{vmatrix} 0 & \bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q} \\ -F_i^\varphi & F_i^\mu \end{vmatrix} = \left(\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q} \right) \cdot F_i^\varphi,$$

$$\Delta_\mu = \begin{vmatrix} \bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q} & 0 \\ F_i^\lambda & -F_i^\varphi \end{vmatrix} = -\left(\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q} \right) \cdot F_i^\varphi.$$

Вирішивши спільно рівняння (4.53) і (4.54), отримаємо:

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda}{dt} &= \frac{\Delta_\lambda}{\Delta} = \frac{(\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q}) \cdot F_i^\varphi}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q})}; \\ \frac{d\mu}{dt} &= \frac{\Delta_\mu}{\Delta} = -\frac{(\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) \cdot F_i^\varphi}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q})}.\end{aligned}\quad (4.55)$$

Підставляючи отримані вирази (4.55) в (4.52), отримуємо швидкість руху точки контакту по твірної поверхні в системі координат S_n :

$$\bar{V}^n = \frac{F_i^\varphi}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q})} \cdot \left[\bar{r}_n^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q}) - \bar{r}_n^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) \right]. \quad (4.56)$$

З огляду на те, що вектор нормалі дорівнює $\bar{N}_n = \bar{r}_n^\lambda \times \bar{r}_n^\mu$, та одиничний вектор нормалі $\bar{e}_n = \frac{\bar{N}_n}{|\bar{N}_n|}$,

$$|\bar{N}_n| \cdot (\bar{q} \times \bar{e}_n) = |\bar{N}_n| \cdot \left(\bar{q} \times \frac{\bar{N}_n}{|\bar{N}_n|} \right) = \bar{q} \times \bar{N}_n = \bar{q} \times (\bar{r}_n^\lambda \times \bar{r}_n^\mu) = \bar{r}_n^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q}) - \bar{r}_n^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q})$$

отримуємо залежність:

$$\left[\bar{r}_n^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q}) - \bar{r}_n^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) \right] = |\bar{N}_n| \cdot [\bar{q} \times \bar{e}_n].$$

Тому, запишемо рівняння (4.46) в наступному вигляді:

$$\bar{V}^n = \frac{F_i^\varphi \cdot |\bar{N}_n| \cdot [\bar{q} \times \bar{e}_n]}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q})}. \quad (4.57)$$

Підставляючи (4.57) в (4.46), отримаємо швидкість переміщення точки контакту по поверхні нарізаного колеса в наступному вигляді:

$$\bar{V}_n^i = \frac{F_i^\varphi \cdot |\bar{N}_n| \cdot [\bar{q} \times \bar{e}_n]}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{q}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{q})} + \bar{V}^{ni}. \quad (4.58)$$

Сп'ямуємо вектор \bar{q} вздовж одиничного вектору дотичного до лінії контакту $\bar{\tau}$. Він буде дорівнювати [152]

$$\bar{q} = \bar{\tau} = \frac{F_i^\mu \cdot \bar{r}_n^\lambda - F_i^\lambda \cdot \bar{r}_n^\mu}{\sqrt{E_n \cdot (F_i^\mu)^2 - 2F_n \cdot F_i^\mu \cdot F_i^\lambda + G_n \cdot (F_i^\lambda)^2}}. \quad (4.59)$$

Частинні похідні рівняння зачеплення (3.76) мають вигляд:

$$\begin{aligned} F_i^\lambda &= \pm \Omega_2' \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha; \\ F_i^\mu &= \pm \sin \beta \cdot \sin \alpha; \\ F_i^\varphi &= \mp R_i \sin \alpha, \end{aligned} \quad (4.60)$$

де Ω_2' – похідна функції Ω_2 по λ :

$$\begin{aligned} \Omega_2' &= \frac{f_2'(\lambda, P_y) \cdot (f_1'(\lambda, P_x))^2}{(f_2'(\lambda, P_y))^2} + \frac{f_2'(\lambda, P_y) \cdot f_1''(\lambda, P_x) \cdot f_1(\lambda, P_x)}{(f_2'(\lambda, P_y))^2} - \\ &- \frac{f_2''(\lambda, P_y) \cdot f_1'(\lambda, P_x) \cdot f_1(\lambda, P_x)}{(f_2'(\lambda, P_y))^2} + f_2'(\lambda, P_y) = 0. \end{aligned} \quad (4.61)$$

Враховуючи (2.36), (2.42), (4.59), (4.60) перетворимо вираз (4.59)

$$\begin{aligned}
\bar{q} = \bar{\tau} &= \frac{\sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot (\bar{i} \cdot f_1'(\lambda, P_x) + \bar{j} \cdot f_2'(\lambda, P_y) \cdot \cos \beta - \bar{k} \cdot f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin \beta)}{\sqrt{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha - 0 + \left(\Omega_2' \right)^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha}} - \\
&- \frac{\Omega_2' \cos \beta \cdot \sin \alpha (\bar{j} \cdot \sin \beta + \bar{k} \cdot \cos \beta)}{\sqrt{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha - 0 + \left(\Omega_2' \right)^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha}} = \\
&= \frac{\bar{i} \cdot \sin \beta \cdot f_1'(\lambda, P_x) + \bar{j} \cdot f_2'(\lambda, P_y) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta - \bar{k} \cdot f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta}{\sqrt{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta + \left(\Omega_2' \right)^2 \cdot \cos^2 \beta}} + \\
&+ \frac{-\bar{j} \cdot \Omega_2' \cos \beta \cdot \sin \beta - \bar{k} \cdot \Omega_2' \cos^2 \beta}{\sqrt{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta + \left(\Omega_2' \right)^2 \cdot \cos^2 \beta}} = \\
&= \frac{\bar{i} \cdot f_1'(\lambda, P_x) \cdot \sin \beta + \bar{j} \cdot \left(f_2'(\lambda, P_y) - \Omega_2' \right) \cos \beta \cdot \sin \beta - \bar{k} \cdot \left(f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta + \Omega_2' \cos^2 \beta \right)}{\sqrt{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta + \left(\Omega_2' \right)^2 \cdot \cos^2 \beta}} \quad (4.62)
\end{aligned}$$

Шукану швидкість переміщення точок контакту в перпендикулярному до лінії контакту напрямку визначимо, як проекцію вектору (2.40) на вектор $\bar{p} = \bar{\tau} \times \bar{e}_n$:

$$u_{\tau i} = \bar{V}_n^i \bar{p} = \frac{F_i^\varphi \cdot |\bar{N}_n|}{F_i^\mu \cdot (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{\tau}) - F_i^\lambda \cdot (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{\tau})} + \bar{V}^{ni} \cdot [\bar{\tau} \times \bar{e}_n]. \quad (4.63)$$

З огляду на залежності (2.36), (2.38), (2.39), (3.75), (4.59), (4.60), (4.62) вираз (4.63) перетворимо:

$$\begin{aligned}
u_{\tau 1} &= \frac{\sqrt{\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2}}{\sqrt{\left(\Omega_2' \right)^2 \cos^2 \beta + \left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right] \cdot \sin^2 \beta}} \times \\
&\times \left[R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2(\lambda, P_y)} \left(\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta \right) \right] \quad (4.64)
\end{aligned}$$

$$u_{\tau 2} = \frac{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}{\sqrt{(\Omega_2')^2 \cos^2 \beta + [(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2] \cdot \sin^2 \beta}} \times \\ \times \left[R_2 - \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta) \right]$$

Щоб отримати істинні значення швидкості необхідно вираз (4.64) помножити відповідно на кутові швидкості обертання шестерні ω_1 і колеса ω_2 .

Сумарна швидкість переміщення точок контакту в напрямку, перпендикулярному лінії контакту при $\omega_1 = 1 \text{ рад/с}$:

$$u_i = u_{\tau 1} + u_{\tau 2} = \frac{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}{\sqrt{(\Omega_2')^2 \cos^2 \beta + [(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2] \cdot \sin^2 \beta}} \times \\ \times \left[2R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta) \cdot \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right] \quad (4.65)$$

Тут $u = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ – передавальне число зубчастої пари.

Співвідношення (4.65) справедливе для циліндричних передач загального вигляду з лінійним контактом, коли лінія контакту у верстатному зачепленні збігається з лінією контакту робочого зачеплення зубчастих коліс.

При $2R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} [\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta] \cdot \left(1 - \frac{1}{u} \right) = 0$ сумарна

швидкість руху точок контакту $u_{\tau} = 0$. Точки контакту, для яких $u_{\tau} = 0$, слід виключити з роботи, тому що в цих точках поверхонь створюються несприятливі умови змащування.

При $(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 = 0$ стає нульовим модуль вектору нормалі

до твірної поверхні, що говорить про наявність на поверхні особливих точок.

4.6.3. Коефіцієнти питомих ковзань

Оцінити зношування тільки по відносній швидкості ковзання спряжених поверхонь є недостатнім. Для більш об'єктивної оцінки зношування зубців застосовуються коефіцієнти питомих ковзань. Коефіцієнти питомих ковзань зубців шестерні і колеса визначаються відповідно за формулами [138]:

$$\eta_1 = \frac{[\bar{V}^{12}]^2}{\bar{V}_n^1 \bar{V}^{12}}; \eta_2 = \frac{[\bar{V}^{12}]^2}{\bar{V}_n^2 \bar{V}^{12}}, \quad (4.66)$$

де \bar{V}_n^1, \bar{V}_n^2 – швидкості руху точок контакту нарізованих поверхонь в напрямку відносної швидкості.

Ці швидкості можна визначити, якщо в рівняння (4.58) замість вектору \bar{q} підставити орт \bar{k} осі аплікат, який перпендикулярний вектору відносної швидкості \bar{V}_n^{12} . Враховуючи вирази (2.36), (2.38), (2.40), (4.60) отримаємо

$$\bar{V}_n^i = \frac{[\bar{i} \cdot \Omega_1 \cdot \cos \beta + f_1(\lambda, P_x)] \cdot R_i f_2'(\lambda, P_y)}{[\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta] \cdot f_1(\lambda, P_x)} + \bar{V}^{ni}. \quad (4.67)$$

Підставляючи у вираз (4.66) значення (3.78), (4.48) і (4.67), визначимо коефіцієнти питомих ковзань:

$$\eta_i = \frac{\pm \frac{u+1}{u}}{\left(\frac{R_i f_2'(\lambda, P_y)}{f_1(\lambda, P_x) \cdot (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta)} \right)^{\pm 1}}. \quad (4.68)$$

З відношення (4.68) випливає, що коефіцієнти питомих ковзань залежать від геометричних розмірів зубчастої передачі, передавального числа, лінії зубців твірної поверхні і вихідного контуру.

У полюсі зачеплення, де $f_1(\lambda, P_x) = 0$, коефіцієнти питомих ковзань дорівнюють нулю. Вони також дорівнюють нулю коли $\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta = 0$. У цьому випадку вектор відносної швидкості $\bar{V}^{(12)}$ збігається з напрямком лінії контакту. При цьому швидкість переміщення точок контакту в напрямку вектору відносної швидкості дорівнює нескінченності.

При виконанні умови

$$\frac{R_i f_2'(\lambda, P_y)}{f_1(\lambda, P_x) \cdot (\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta)} \pm 1 = 0$$

на поверхні нарізуваних зубців з'являються особливі точки, в яких коефіцієнти питомих ковзань дорівнюють нескінченності. Ці точки на поверхнях зубців шестерні та колеса необхідно виключити з роботи.

4.6.4. Кут між відносною швидкістю і напрямком лінії контакту

Величина кута між відносною швидкістю ковзання робочих поверхонь зубців і напрямком лінії контакту, як і сумарна швидкість, істотно впливають на утворення масляного клину між контактуючими поверхнями. Чим ближче цей кут за своєю величиною до прямого, тим краще умови для змащення контактуючих поверхонь.

Тангенс кута можна визначити за формулою [34]:

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{|\bar{\tau} \times \bar{V}^{12}|}{\bar{\tau} \cdot \bar{V}^{12}}, \quad (4.69)$$

або, враховуючи (2.36), (4.48), (4.59), (4.60) після перетворень матимемо:

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}{\sin \beta \cdot \cos \beta} \times \frac{\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta}{f_2'(\lambda, P_y) \cdot \Omega_2' - \left((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right)} \quad (4.70)$$

Зі співвідношення (4.70) випливає, що кут між швидкістю відносного руху поверхонь зубців і напрямком лінії контакту ν дорівнює 90° :

- при $\beta=0$, тобто в перетинах зубчастого вінця, де кут нахилу твірної поверхні зубців дорівнює нулю;
- при $\beta=\pi/2$, що є не реальним для циліндричних зубчастих передач;
- при виконанні рівності

$$f_2'(\lambda, P_y) \cdot \Omega_2' - \left((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right) = 0$$

При виконанні рівності $\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta = 0$, або $(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 = 0$ кут $\nu=0$, що є несприятливим для створення масляного клина.

4.6.5. Приведена кривизна поверхонь зубців в перпендикулярному до лінії контакту напрямку

Приведена кривизна є одним з основних показників працездатності, що впливають на контактну міцність поверхонь зубців. Чим менше приведена кривизна, тим більше площа дотикання поверхонь зубців, а, отже, менше контактне руйнування зубців. Найбільша приведена кривизна контактуючих поверхонь зубців знаходиться в перерізі, перпендикулярному до лінії контакту, тому по її значенню ведеться оцінка контактної міцності зубців

передачі.

Приведена нормальна кривизна дорівнює [263]:

$$\chi_{np} = \chi^{(1)} - \chi^{(2)}, \quad (4.71)$$

де $\chi^{(1)}, \chi^{(2)}$ – нормальні кривизни поверхонь зубців шестерні та колеса в загальному нормальному перетині. Їх можна виразити через кривизну твірної поверхні

$$\chi^{(i)} = \chi^{(n)} - \chi_{np}^{(i)} \quad (4.72)$$

Тут $\chi^{(n)}$ – кривизна твірної поверхні в загальному нормальному перерізі; $\chi_{np}^{(i)}$ – приведена кривизна твірної поверхні та поверхні нарізованого колеса в тому ж перерізі.

Тоді (4.71) можна перетворити:

$$\chi_{np} = -\chi_{np}^{(1)} + \chi_{np}^{(2)} \quad (4.73)$$

Приведена кривизна твірної поверхні та поверхні нарізованого колеса в перпендикулярному до лінії контакту напрямку згідно роботи [135] визначається співвідношенням

$$\chi_{np}^{(i)} = \frac{E_n (F_i^\mu)^2 - 2F_n F_i^\lambda F_i^\mu + G_n (F_i^\lambda)^2}{\Delta_i}, \quad (4.74)$$

де визначник

$$\Delta_i = \left\| \begin{matrix} E_n & E_n & (\bar{V}^{(ni)} \bar{r}_n^\lambda) \\ F_n & G_n & (\bar{V}^{(ni)} \bar{r}_n^\mu) \\ F_i^\lambda & F_i^\mu & F_i^\varphi \end{matrix} \right\|, \quad (4.75)$$

або, враховуючи (2.36), (2.42), (3.78), (4.60) отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta_i = & \mp |\bar{r}_n'|^2 \cdot f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2} \times \\ & \times \left[R_i \pm \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta + \Omega_2' \cdot \cos^2 \beta) \right]. \end{aligned} \quad (4.76)$$

Приведена кривизна χ_{np} після перетворень:

$$\begin{aligned} \chi_{np}^i = & \mp \frac{f_2'(\lambda, P_y)}{\left[(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \\ & \times \frac{\left[\left((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 \right) \cdot \sin^2 \beta + (\Omega_2')^2 \cdot \cos^2 \beta \right]}{\left[R_i \pm \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} (f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta + \Omega_2' \cdot \cos^2 \beta) \right]}. \end{aligned} \quad (4.77)$$

Підставляючи (4.77) в (4.73) отримаємо шукану приведену нормальну кривизну контактуючих поверхонь зубців в перпендикулярному до лінії контакту напрямку:

$$\begin{aligned}
\chi_{np} = & \frac{(R_1 + R_2) \cdot f_2'(\lambda, P_y)}{\left[\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \\
& \times \frac{1}{\left[R_1 + \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} \left(\Omega_2' \cdot \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta \right) \right]} \times \\
& \times \frac{\left[\left(\Omega_2' \right)^2 \cos^2 \beta + \left(\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right) \cdot \sin^2 \beta \right]}{\left[R_2 - \frac{f_1(\lambda, P_x)}{f_2'(\lambda, P_y)} \left(\Omega_2' \cos^2 \beta + f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta \right) \right]}.
\end{aligned} \tag{4.78}$$

Локальний поверхневий контакт зубців шестерні та колеса буде, якщо кривизни в нормальному перерізі, перпендикулярному до лінії контакту поверхонь, які взаємно огибаються, рівні між собою, тобто при $\chi_{np}=0$.

Це можливо, якщо виконується умова

$$\left[\left(\Omega_2' \right)^2 \cos^2 \beta + \left(\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right) \cdot \sin^2 \beta \right] = 0$$

Оскільки коефіцієнти при $\sin^2 \beta$ і $\cos^2 \beta$ додатні, і випадок $\beta=\pi/2$ є не реальним, то $\chi_{np} = 0$ тільки при $\beta=0$, тобто коли кут нахилу зубців дорівнює нулю.

На рис. 4.14 показані графіки, отримані для порівняльного візуального аналізу приведеної кривизни поверхонь зубців в напрямку, перпендикулярному лінії контакту в процесі інтерактивного керування геометрією за допомогою керуючих елементів системи формоутворення [76], [79].

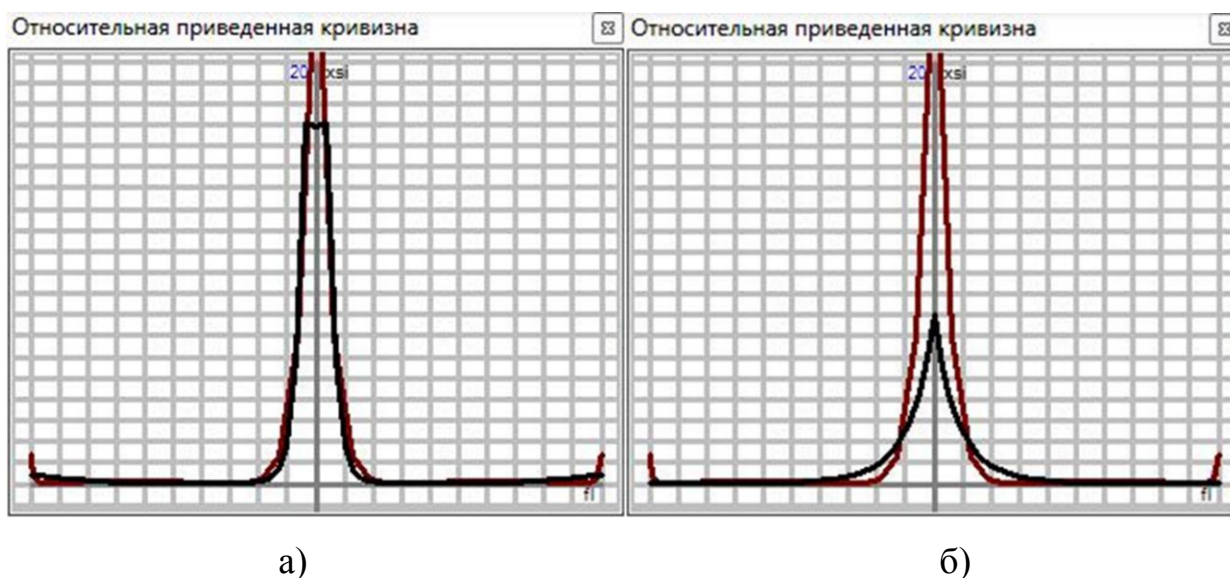


Рис. 4.14. Аналіз приведеної кривизна поверхонь зубців в напрямку, перпендикулярному лінії контакту: а – графіки початкових значень приведеної кривизни спряжених поверхонь зубців; б – зменшення приведеної кривизни в плюсі зачеплення в 2,5 рази

4.6.6. Функціональні обмеження при формоутворенні зубчастих коліс

В якості функціональних обмежень можна використовувати ряд факторів, зміна яких нижче певної межі негативно позначається на працездатності передачі. Такими обмеженнями можуть слугувати коефіцієнт перекриття, умови підрізання і загострення зубців та ін.

Коефіцієнт перекриття є важливим показником працездатності. Він визначає кількість одночасно контактуючих зубців і характеризує плавність роботи зубчастої пари.

Так як циліндричні передачі загального вигляду мають зубці з кутом нахилу відмінним від нуля необхідно розраховувати торцевий і осьовий коефіцієнти перекриття.

Коефіцієнт торцевого перекриття дорівнює

$$\varepsilon_{\alpha} = z_i \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi}, \quad (4.79)$$

де φ_1, φ_2 – кути повороту шестерні (колеса), відповідні значенням λ_1 та λ_2 ; z_i – кількість зубців шестерні (колеса).

Кути повороту шестерні (колеса), що відповідають значенням λ_1 та λ_2 можна визначити з рівняння зачеплення (3.76)

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{\mu_1 \cdot \sin \beta + \Omega_2(\lambda_1) \cos \beta}{R_i}; \\ \varphi_2 &= \frac{\mu_2 \cdot \sin \beta + \Omega_2(\lambda_2) \cos \beta}{R_i}.\end{aligned}\tag{4.80}$$

де λ_1, λ_2 – відповідають граничним точкам лінії зачеплення і визначаються з виразу (3.80).

Для визначення параметрів μ_1 і μ_2 необхідно підставити $z = \text{const}$ в останнє рівняння (3.77) і вирішити його щодо $\mu(\lambda)$.

З урахуванням (4.80) коефіцієнт торцевого перекриття (4.79) набуде вигляду

$$\varepsilon_\alpha = z_i \frac{[\Omega_2(\lambda_2) + f_2(\lambda_2) - \Omega_2(\lambda_1) - f_2(\lambda_1)] \cos \beta}{2\pi R_i}.\tag{4.81}$$

З виразу (4.81) випливає, що коефіцієнт торцевого перекриття змінюється при переході від одного торцевого перерізу зубчастого вінця до іншого. При $\beta = \text{const}$ коефіцієнт ε_α уздовж зубчастого вінця не змінюється.

При визначенні осьового коефіцієнта перекриття зафіксуємо $\lambda = \lambda_0 = \text{const}$, параметри μ_1^* і μ_2^* визначимо з останнього рівняння (3.77) при $z=0$ і $z=b$, де b – ширина зубчастого вінця.

Коефіцієнт осьового перекриття дорівнює:

$$\varepsilon_\beta = z_i \frac{b \sin \beta}{2\pi R_i}, \quad (4.82)$$

При зміні λ , тобто при переході від однієї точки профілю до іншої, коефіцієнт осевого перекриття змінюється. Для значення $\beta(\mu_1^*) = \beta(\mu_2^*)$ и $\beta = \text{const}$ вираз (4.82) перетвориться:

$$\varepsilon_a = \frac{Y(\mu_2^*) - Y(\mu_1^*)}{2\pi R_i / Z_i} \quad (4.83)$$

Підрізання зубців циліндричних коліс послаблює основу зубців, і, тим самим, призводить до зниження зламної міцності нарізаних коліс. Тому при синтезі зубчастих передач необхідно обмежувати твірну поверхню, виключаючи з неї точки, що викликають підрізання.

Підрізання зубців у верстатному зачепленні пов'язано з появою на огибаючій поверхні особливих точок, в яких вектор нормалі $\bar{N}_n = 0$ [136]. Ця умова виконується при

$$\begin{vmatrix} F_i^\lambda & F_i^\mu & F_i^\varphi \\ F_n & G_n & (\bar{r}_n^\lambda \cdot \bar{V}^{ni}) \\ E_n & F_n & (\bar{r}_n^\mu \cdot \bar{V}^{ni}) \end{vmatrix} = 0. \quad (4.84)$$

Розкриваючи визначник (4.84) і враховуючи (2.36), (2.42), (3.78), (4.60), отримуємо:

$$\begin{aligned} & |\bar{r}_n'|^2 \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2} \times \\ & \times [f_1(\lambda, P_x) \Omega_2' \cos^2 \beta + f_1(\lambda, P_x) f_2'(\lambda, P_y) \cdot \sin^2 \beta \pm R_i f_2'(\lambda, P_y)] = 0, \end{aligned} \quad (4.85)$$

де знак «плюс» відноситься до шестерні, а «мінус» до колеса.

Випадки, коли $\left| \bar{r}_n' \right| = 0$ і $\left(f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left(f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 = 0$, виключимо з розгляду, як нереальні. Залишається умова:

$$\left| f_1(\lambda, P_x) \Omega_2' \cos^2 \beta + f_1(\lambda, P_x) f_2'(\lambda, P_y) \sin^2 \beta \pm R_i f_2'(\lambda, P_y) \right| = 0. \quad (4.86)$$

Отже, для запобігання підрізанню зубців нарізуваних коліс необхідно на твірній поверхні виключити точки, які визначаються розв'язком рівнянь (4.86).

З умови міцності передач товщина зубців на вершинах не повинна бути менше допустимої величини. Загострення зубців характеризується перетином їх бічних поверхонь. Отже, товщина зуба в точках загострення дорівнює нулю. Зазвичай товщина зуба на вершинах повинна бути не менше $(0,25 \dots 0,3)t$, де t – модуль зачеплення.

Для визначення товщини зубців скористаємося рівнянням (3.79)

$$\begin{aligned} S_{ui} &= 2 \cdot \left| [R_1 + f_1(\lambda, P_x)] \sin \varphi_1 - \Omega_1 \cos \beta \cos \varphi_1 \right|; \\ S_k &= 2 \cdot \left| [R_2 - f_1(\lambda, P_x)] \sin \varphi_2 - \Omega_1 \cos \beta \cos \varphi_2 \right|. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Параметри λ_i визначаємо з рівняння (3.80), підставляючи замість R_{bi} значення радіусів кіл виступів шестерні та колеса R_{ai} . Значення $\mu(\lambda)$ визначається з останнього рівняння (3.79) при заданому z_i . Значення параметрів φ_i знаходяться з рівняння зачеплення (3.77).

Висновки до розділу 4

1. Для оцінки процесу формоутворення зубчастих коліс і експлуатаційних параметрів зубчастих передач доцільно використовувати геометричні та кінематичні показники функціонально залежні від єдиних уніфікованих керуючих параметрів. Це дозволяє візуально оцінювати якість

процесу безпосередньо під час інтерактивного формоутворення функціональних поверхонь.

2. Для кінематичних схем формоутворення 3-го класу виведені математичні залежності геометричних та кінематичних показників, таких, як відносна швидкість ковзання поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення, кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній, приведена кривизна в напрямку, перпендикулярному лінії контакту поверхонь, сумарна швидкість переміщення точок контакту поверхонь, що беруть участь в процесі формоутворення, коефіцієнти питомих ковзань. Всі вони є функціями від уніфікованих керуючих параметрів, що дозволяє автоматизувати синтез функціональних поверхонь.

3. Для кінематичних схем формоутворення 2-го класу отримані математичні залежності, які стали основою для розробки методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення для аналізу геометричних та кінематичних показників процесу формоутворення зубчастих коліс.

4. Отримано математичні залежності, що дозволяють враховувати геометричні обмеження при формоутворенні зубчастих коліс.

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [31], [50], [56], [57], [58], [63], [90], [205], [236], [237].

РОЗДІЛ 5

КОМП'ЮТЕРНА ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

В даний час у промисловості активно впроваджуються нові інформаційні технології наскрізної підтримки складної наукомісткої продукції на всіх етапах її життєвого циклу, в тому числі: на етапах технічного задуму, проектування, виробництва, продажу, експлуатації, сервісного обслуговування, ремонту та утилізації в рамках єдиної інформаційної системи. Така стратегія систематичного підвищення ефективності, продуктивності і рентабельності процесів господарської діяльності підприємства, а також об'єднання сучасних методів інформаційної взаємодії етапів життєвого циклу продукції називається CALS-технологіями (Continuous Acquisition and Life-cycle Support – безперервна інформаційна підтримка життєвого циклу продукту) [168].

Такі технології дозволяють знизити трудомісткість проектування, виробництва, продажу, експлуатації, сервісного обслуговування та ремонту складного обладнання та підвищити продуктивність праці на багатьох етапах життєвого циклу, як мінімум, на 30% [186].

У той же час, ці інформаційні технології наскрізної підтримки етапів життєвого циклу продукції можна використовувати не тільки для підвищення ефективності, продуктивності та рентабельності процесів господарської діяльності підприємства, а й для створення нових механізмів або радикального вдосконалення відомих, із застосуванням наукоємних процесів, розширення області існування етапів життєвого циклу виробів, узагальнюючих математичних моделей, інформаційних технологій, сучасних технічних засобів [248].

5.1. Комп'ютерно-інтегрована система, як засіб інформаційного забезпечення конструкторсько-технологічних етапів життєвого циклу зубчастих передач

Підвищення продуктивності і зниження термінів проведення конструкторсько-технологічної підготовки виробництва зубчастих коліс на даний час неможливо без використання автоматизованих систем проектування, виробництва, аналізу і контролю. Велика розмаїтість промислових систем CAD/CAM/CAE дозволяє прискорити відокремлені етапи життєвого циклу зубчастих коліс, проте повнофункціональна автоматизована система формоутворення, яка б повною мірою відповідала вимогам, сформульованим в п.1.1, досі не розроблена.

До використання систем CAD/CAM/CAE процес формоутворення відбувався згідно схеми, показаної на рис. 5.1. На рис. 5.2 показана сучасна ситуація з використанням комп'ютерних технологій. Для того, щоб прискорити етапи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва зубчастих коліс, необхідно автоматизувати процес формоутворення та інтегрувати його в загальну систему (рис. 5.3).

На рис. 5.4 показана пропонована комп'ютерно-інтегрована система формоутворення зубчастих коліс, у якій на вході задана початкова оброблювана поверхня і можливі схеми формоутворення.

На виході системи необхідно отримати комп'ютерні моделі поверхонь деталей, які є основою для генерації технологічних процесів оброблення деталей на верстатах з ЧПК, а також, автоматизованого контролю геометрії деталей по моделі-еталону. Ця інформація може передаватися в промислові CAD-системи різними способами – у вигляді геометричних образів або масивів даних. Але найбільш ефективним було б підключення розроблених параметричних бібліотек деталей безпосередньо до системи формоутворення на основі єдиного параметричного простору.



Рис. 5.1. Процес формоутворення без використання комп'ютерних технологій

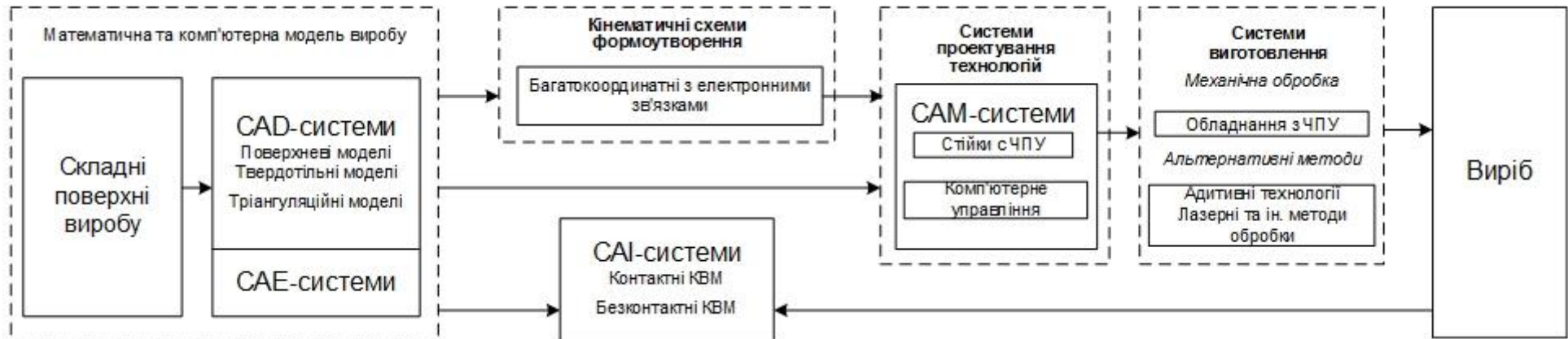


Рис. 5.2. Процес формоутворення з використанням комп'ютерних технологій

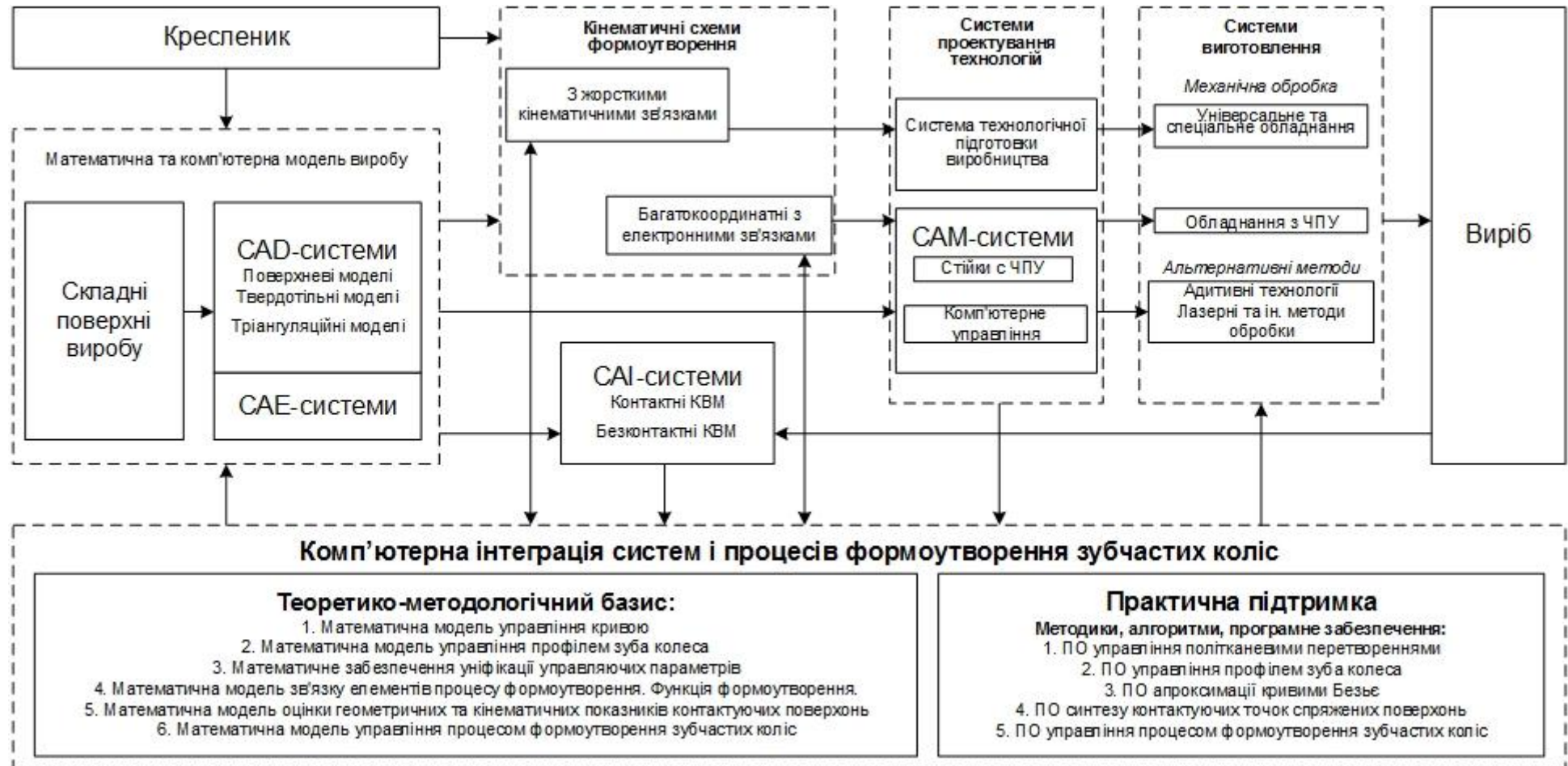


Рис. 5.3. Комп'ютерна інтеграція систем і процесів формоутворення зубчастих коліс

Аналогічна ситуація спостерігається і з комп'ютерними моделями інструментальних поверхонь. При наявності параметричних бібліотек інструментів можливо отримувати на виході готові моделі інструментів.

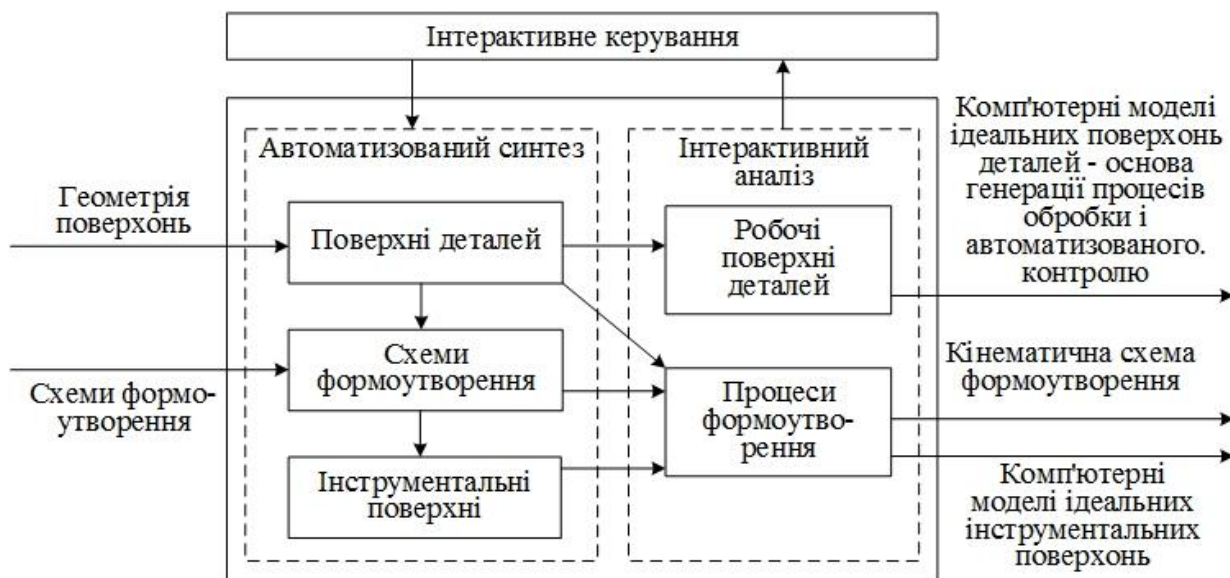


Рис. 5.4. Комп'ютерно-інтегрована система формоутворення

Синтезовані кінематичні схеми формоутворення дозволяють вибрати необхідне обладнання для виготовлення деталей.

Інтерактивне керування автоматизованою системою формоутворення має здійснюватися за допомогою уніфікованих керуючих параметрів, які змінюють форму вихідної поверхні та кінематичну схему формоутворення. При цьому одночасно змінюються всі елементи системи, включаючи геометричні та кінематичні показники процесу формоутворення. Інтерактивний аналіз цих показників в процесі синтезу служить зворотним зв'язком і допомагає додатково використовувати досвід і знання проектувальника для швидкої оцінки і результату.

В результаті таких ітераційних дій можна вибрати раціональний процес формоутворення та геометрію оброблюваних деталей.

На рис. 5.5 показані функціональні і параметричні зв'язки елементів пропонуваної комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс при механічній обробці.



Рис. 5.5. Функціональний та параметричний зв'язок елементів системи формоутворення зубчастих коліс

Математичний опис поверхонь зубчастих коліс передбачає наявність рівнянь інтерактивного керування поверхні в системі координат S_I (рис. 2.19):

$$\bar{r}_1(\lambda, \mu) = f_1(P, N),$$

де $P = P(p_0, p_1, p_2, p_3)$, $N = N(n_0, n_1, n_2, n_3)$ – вектори керуючих і опорних точок (рис. 2.19).

Поверхня спряженого інструменту буде однозначно залежати від зміни геометрії оброблюваної поверхні та керуючих параметрів схеми формоутворення, зв'язків огинання та кінематичних зв'язків:

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N, G) = M_{21}(G) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N),$$

де $M_{21}(G)$ – матриця переходу від системи координат оброблюваної поверхні S_I до системи координат інструментальної поверхні S_2 ; $G = G(a_w, \gamma)$ – функція від керуючих функцією формоутворення параметрів: a_w – міжосьова відстань, γ – кут схрещування осей.

Система рівнянь, що використовується для побудови графіків для оцінки процесу формоутворення також однозначно залежить від керуючих

параметрів системи:

$$F_3(\lambda, \mu) = f_3(f_{31}, f_{32}, \dots, f_{3k}),$$

де $f_{31}(\lambda, \mu) = f_{31}(P, N, G)$, $f_{32}(\lambda, \mu) = f_{32}(P, N, G)$, ..., $f_{3k}(\lambda, \mu) = f_{3k}(P, N, G)$ функції, що характеризують процес формоутворення, які однозначно залежать від керуючих параметрів P, N, G .

Функціональні залежності $P(x_p, y_p) = f_P(F_3)$, $N(y_n, z_n) = f_N(F_3)$, $G(a_w, \gamma) = f_G(F_3)$ є основою для візуалізації у вигляді графіків і аналізу проектування.

Реалізація модульності побудови системи формоутворення зубчастих коліс дозволяє без додаткових витрат на розробку спеціального програмного забезпечення розширити її в частині аналізу взаємодії робочих поверхонь зубчастих коліс, як показано на рис. 5.6, де представлена багатопотокова система формоутворення, в якій синтез і аналіз здійснюються одночасно для двох контактуючих деталей. Важливим є те, що універсальні керуючі параметри залишаються єдиними для всієї системи та відповідають вимогам інваріантності, єдності та мінімальної достатності керуючих параметрів.

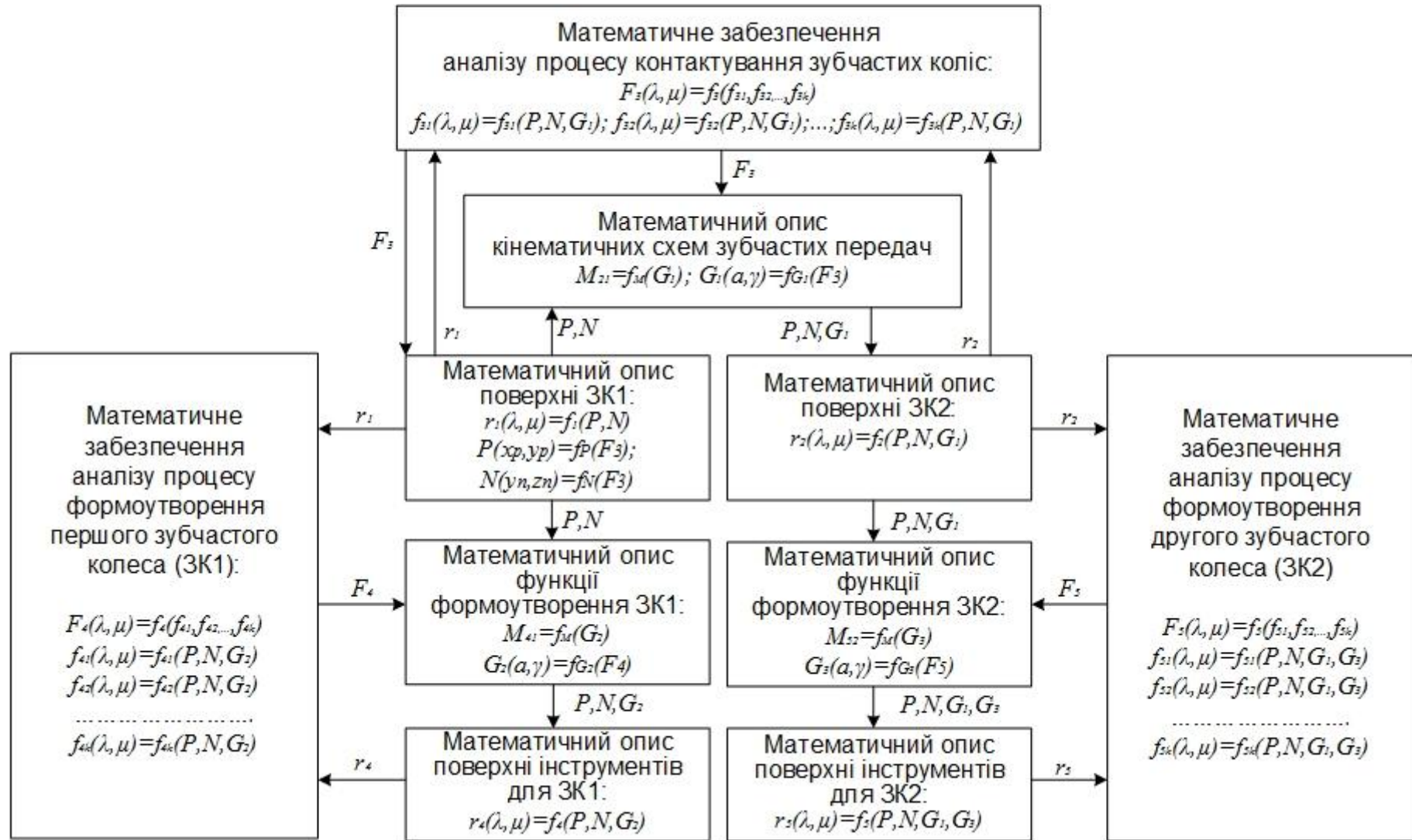


Рис. 5.6. Багатопотокова система формоутворення

5.2. Методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс

У попередніх розділах проаналізовані передумови і можливості розробки комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс. Проведено теоретичні дослідження та отримані математичні залежності, що дозволяють керувати геометрією функціональних поверхонь і одночасно аналізувати геометричні та кінематичні показники їх взаємодії.

Розроблене математичне забезпечення уніфікує опис як самих поверхонь, так і кінематичних схем їх формоутворення. Запропоновано нові типи кінематичних схем формоутворення.

Для аналізу, в т. ч. візуального, геометричних та кінематичних параметрів взаємодії спряжених поверхонь в точках контакту, отримані математичні залежності, в основі яких лежать уніфіковані керуючі параметри.

Показано, як можна запропоновану систему формоутворення функціональних поверхонь зубчастих коліс та інструментів інтегрувати в промислові автоматизовані системи проектування, аналізу, виробництва і контролю.

Тому для завершення наукової роботи необхідно розробити і впровадити нові методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення, які практично реалізують можливості комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс.

5.2.1. Програмне забезпечення «СОРТеR» для керування простором шляхом політканинних перетворень

Програмне забезпечення «СОРТеR» призначене для керування простором шляхом політканинних перетворень [234].

Термін «політканина» введено у вжиток відомим німецьким геометром, керівником Гамбурзької математичної школи і послідовником Ф. Клейна

В. Бляшке в кінці 20-х років XX століття.

За допомогою керуючих точок політканинне перетворення дозволяє змінювати форму будь-якої кривої або поверхні, обраних в якості прообразу. При цьому форма кривої або поверхні змінюються в нерухомій системі координат. Крива вписується в політканинну систему координат, причому дві осі системи є дотичними в початковій і кінцевій точках кривої.

На рис. 5.7 представлений інтерфейс програми «СОРТеR».

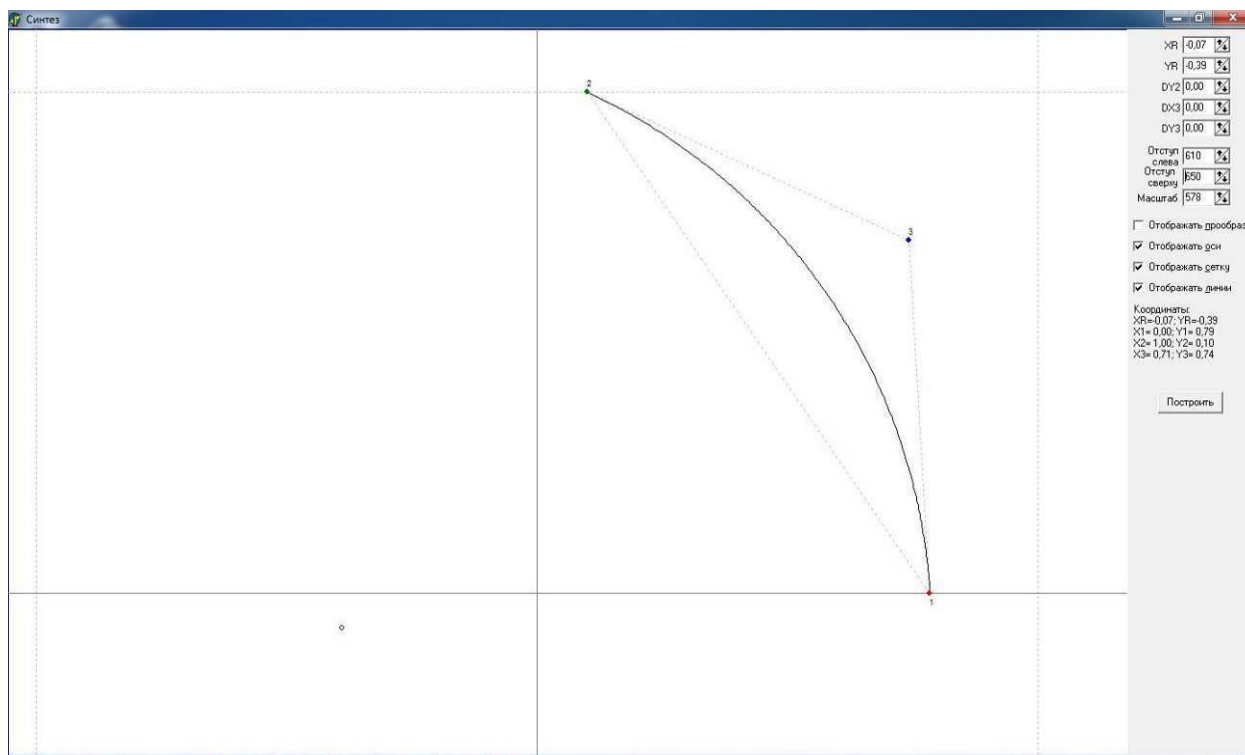
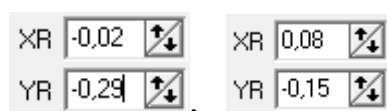


Рис. 5.7. Інтерфейс програми «СОРТеR» [234]

Вихідними даними даної програми є прообраз кривої, її початкова і кінцева точки та характерні точки політканинної системи координат.

Як прообраз обрана дуга кола, радіусом і нахилом якої можна керувати, захоплюючи і переміщаючи курсором по екрану точку центру дуги O_r або за допомогою збільшень dx_r , dy_r (рис. 5.8):



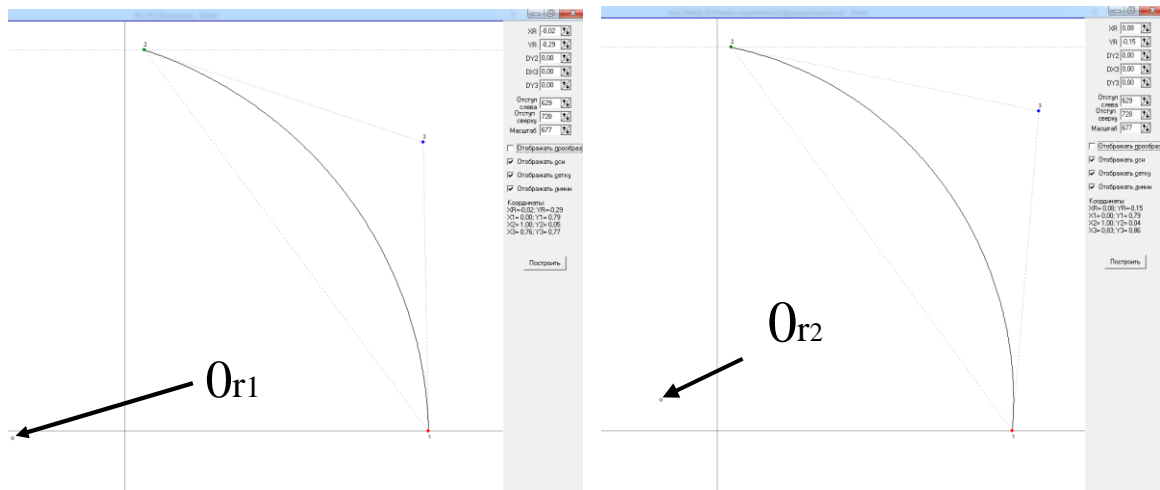
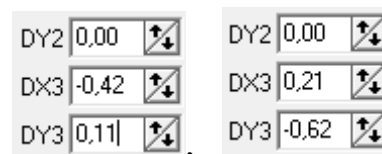


Рис. 5.8. Керування формою дуги кола (прообразу) шляхом зміни координат центру дуги O_r

Точки 1 і 2 кривої прообразу збігаються з характерними точками політканинної системи координат. Ці точки ще характерні тим, що в них розташовуються точки перетину політканинної системи координат. Точка 1 жорстко зафіксована на осі X системи координат. Координата x_2 точки 2 дорівнює 1 і не змінюється в процесі перетворень. Координатою y_2 точки 2 можна керувати за допомогою курсору, захоплюючи і переміщаючи її по екрану або за допомогою збільшення dx_2 :



Точка 3 політканинної системи координат розташовується на перетині осей політканинної системи координат, які проведені з точок 1 і 2 по дотичній до кривої (прообразу). Цією точкою також можна керувати, захоплюючи її курсором і переміщаючи по екрану, або за допомогою збільшень dx_3 , dy_3 (рис. 5.9):



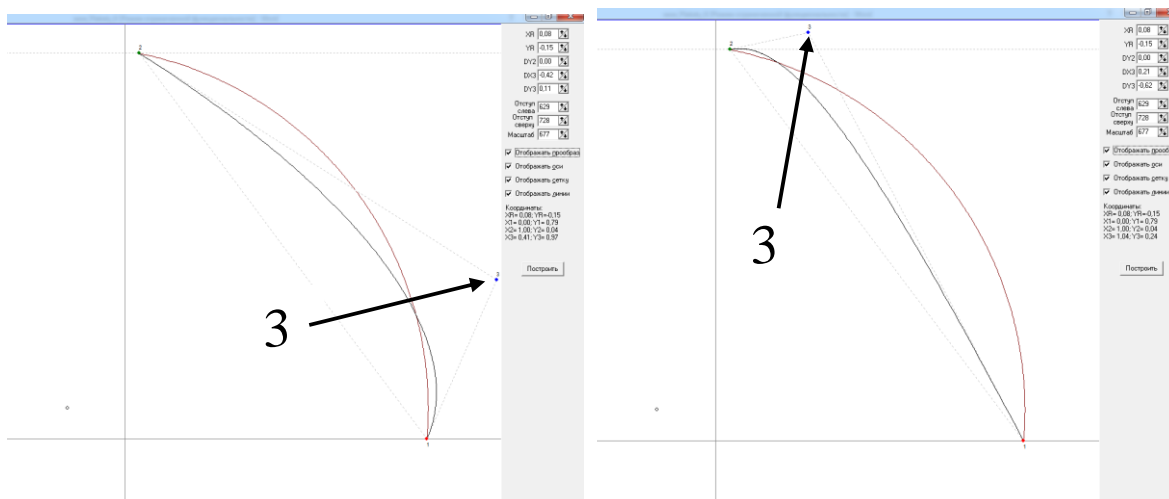


Рис. 5.9. Перетворення (деформація) дуги кола в шукану криву шляхом перетворення простору (точка 3)

Для зручності візуалізації отриманих результатів в програмі передбачено переміщення кривої по екрану та її масштабування:

Отступ слева	600	↕
Отступ сверху	400	↕
Масштаб	110	↕

Ці дії можна здійснювати і за допомогою традиційних операцій роботи з системою.

Для зручності роботи в програмі передбачені можливості відображення прообразу кривої, осей декартової системи координат і масштабної сітки:

<input type="checkbox"/>	Отображать прообраз
<input checked="" type="checkbox"/>	Отображать оси
<input checked="" type="checkbox"/>	Отображать сетку

Теорія і особливості застосування політканинних перетворень в керованому синтезі зубчастих зачеплень описані розділі 2 і роботах [126], [128]. Як результат програма видає координати керуючих точок політкантинної системи координат і центру дуги кола прообразу:

```
Координаты:
XR= 0,00; YR=5,00
X1= 0,00; Y1= 0,79
X2= 1,00; Y2= 0,70
X3= 0,50; Y3= 0,79
```

Перевагами політканинних перетворень є те, що в якості кривої прообразу можна вибирати будь-яку аналітично задану криву, яка описує вихідний контур твірної поверхні, незалежно від виду математичного опису цієї кривої. Перетворену криву можна передавати в системи 3D-моделювання для розробки тривимірних моделей зубчастих коліс та інструменту.

Розроблена теорія дозволяє визначати геометричні та кінематичні показники для перетвореного вихідного контуру. На її основі можливий подальший розвиток програми з візуальним відображенням графіків зміни показників, що характеризують процес синтезу нових зачеплень.

5.2.2. Програмне забезпечення «COSET» для керування формою складної поверхні

Програмне забезпечення «COSET» призначене для керування формою складної поверхні [235]. Це актуально, коли напрямна має форму, відмінну від прямої, наприклад, в передачах з круговою лінією зубців або з поздовжньою модифікацією їх форми. В цьому випадку недостатньо керувати тільки профілем.

У програмі розглянута можливість керування як профілем, представленим сплайновою кривою Безьє 3-го порядку, так і напрямною, що представляє собою дугу кола.

На рис. 5.10 представлений інтерфейс програми «COSET».

Інтерфейс системи містить такі елементи:

- робоче вікно, в якому здійснюється зміна форми кривих за допомогою керуючих точок;
- інструментальну панель з діалоговими вікнами, які слугують як відображенню поточної інформації так і для керування процесом синтезу;
- вікно 3D-моделі твірної поверхні.

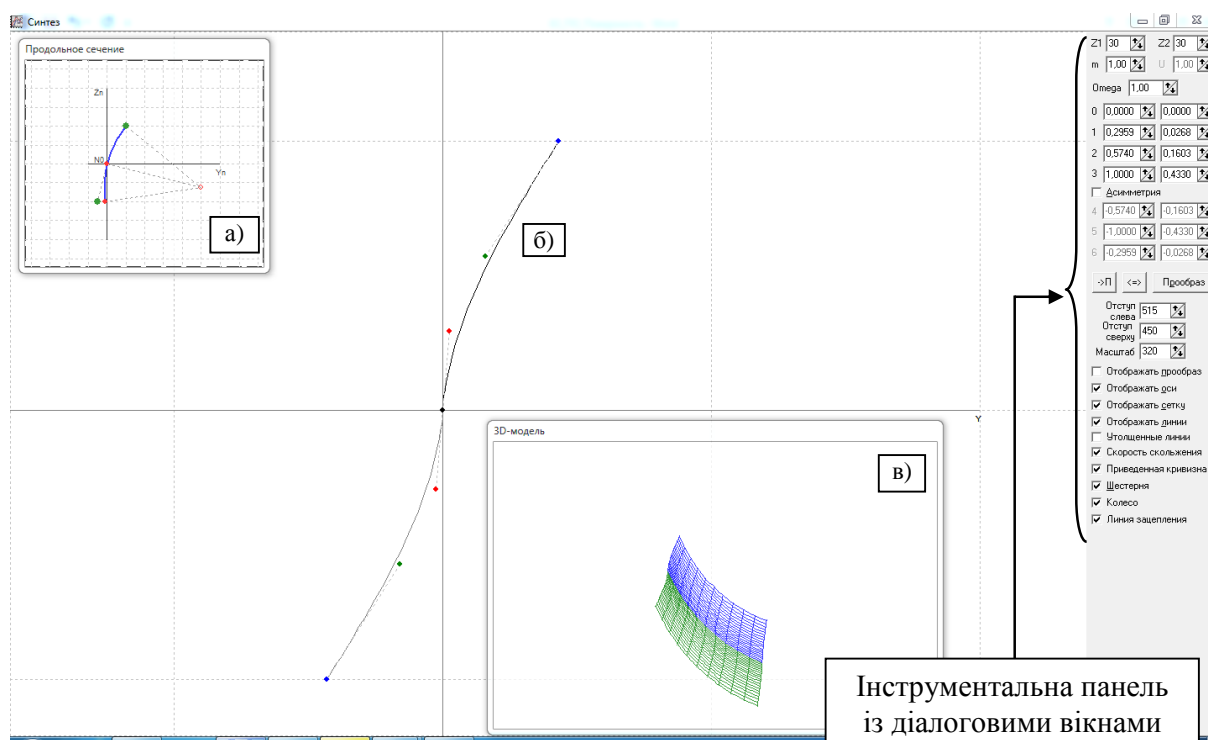


Рис. 5.10. Интерфейс програми «COSET» [235]:

а – інтерактивне керування направляючою; б – інтерактивне керування профілем; в – вікно 3D-моделі твірної поверхні

Поздовжньої лінією зуба керують в діалоговому вікні, представленому на рис. 5.11:

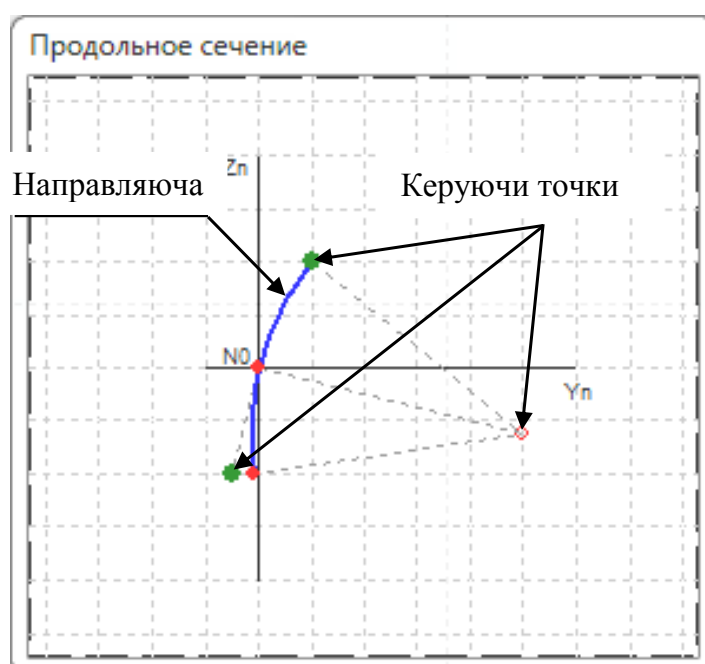


Рис. 5.11. Інтерактивне керування направляючою

Радіус дуги змінюють, захоплюючи курсором центр кола або верхню точку, кутом нахилу дотичної до кривої в середньому перерізі – переміщаючи нижню точку.

Для керування кривою Безьє 3-го порядку, що описує профіль поверхні, можна переміщати як керуючі точки, так і задавати чисельні значення координат керуючих точок в діалоговому вікні. При цьому можна враховувати асиметричність профілю (рис. 5.12):

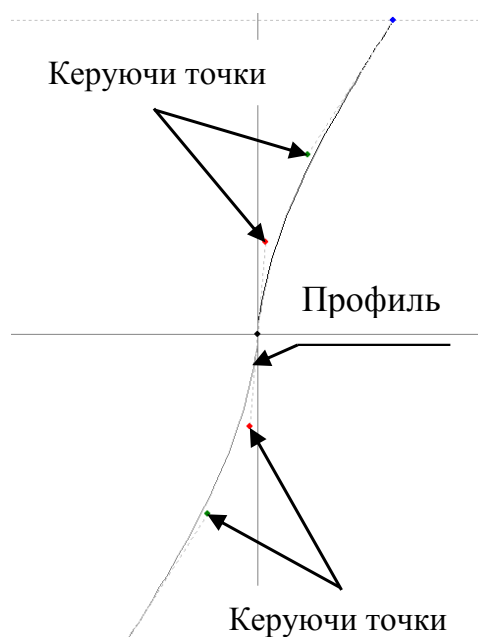


Рис. 5.12. Інтерактивне керування профілем

Інструментальна панель з діалоговими вікнами складається з наступних функціональних зон:

1. Зона параметрів зубчастої передачі, яка слугує відображенню та зміні кількості зубців передач Z_1 і Z_2 , модуля m (мм), передаточного числа U , кутової швидкості привідного колеса ω (сек^{-1}):

Z_1	14	↕	Z_2	88	↕
m	1,00	↕	U	6,29	↕
Ω	1,00	↕			

2. Зона координат керуючих точок, яка слугує відображенню поточних значень координат керуючих точок і, при необхідності, введення їх

значень з клавіатури. При включенні опції «Асиметрія», додатковою ділянкою кривої можна керувати незалежно від заповнюваної:

0	0,0000	-0,7854
1	0,2959	-0,7586
2	0,5740	-0,6251
3	1,0000	-0,3524
<input checked="" type="checkbox"/> Асиметрия		
4	-0,5740	-0,9457
5	-1,0000	-1,2184
6	-0,2959	-0,8122

3. Зона керування прообразом, яка слугує введенню поточних значень координат кривої, як нового прообразу, а також обміну місцями образу кривої та її прообразу:

>П	<=>	Прообраз
----	-----	----------

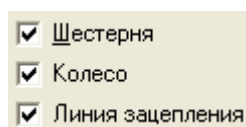
4. Зона керування зображенням в робочому полі, яка слугує масштабуванню і переміщенню зображення кривої. Переміщення можна здійснювати також за допомогою правої кнопки миші, а масштабування за допомогою коліщатка миші:

Отступ слева	690
Отступ сверху	335
Масштаб	320

5. Зона вмикання/вимикання допоміжних ліній, відображення прообразу і керування товщиною ліній відтворення:

<input type="checkbox"/>	Отображать прообраз
<input checked="" type="checkbox"/>	Отображать оси
<input checked="" type="checkbox"/>	Отображать сетку
<input checked="" type="checkbox"/>	Отображать линии
<input type="checkbox"/>	Утолщенные линии

6. Зона вмикання/вимикання видимості ліній робочих ділянок зубців шестерні і колеса, а також видимості лінії зачеплення:



Теорія і особливості застосування керування формою твірної поверхні зубчастого зачеплення описані в розділі 2 та роботах [64], [86].

Результатами роботи програми є 3D-модель твірної поверхні і дані для розрахунку геометричних і кінематичних показників зачеплення (рис. 5.13, рис. 5.14):

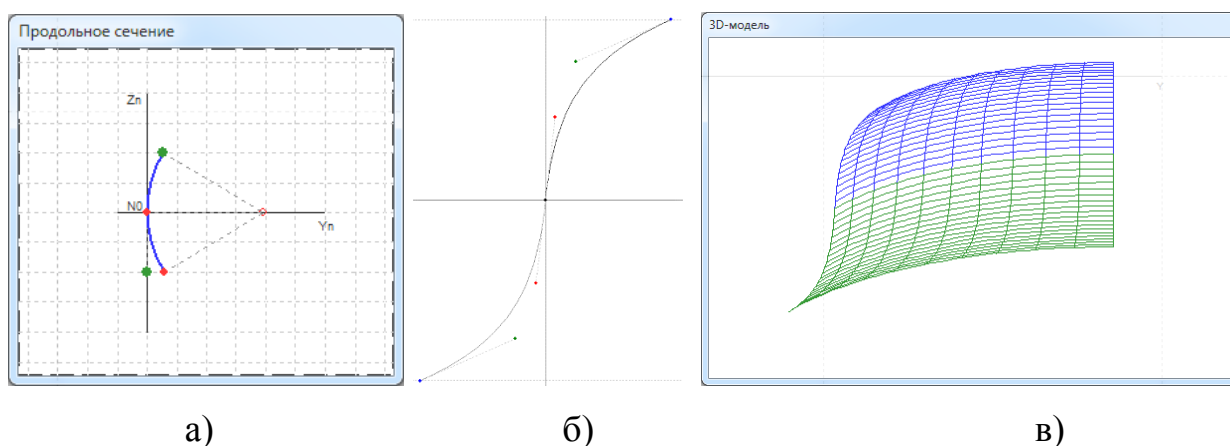


Рис. 5.13. Зміна форми кривої Безьє за допомогою керуючих і опорних точок:
а – вікно з поздовжньою лінією зуба; б – інтерактивне керування кривою Безьє 3-го порядку, що описує профіль зуба; в – вікно 3D-моделі твірної поверхні

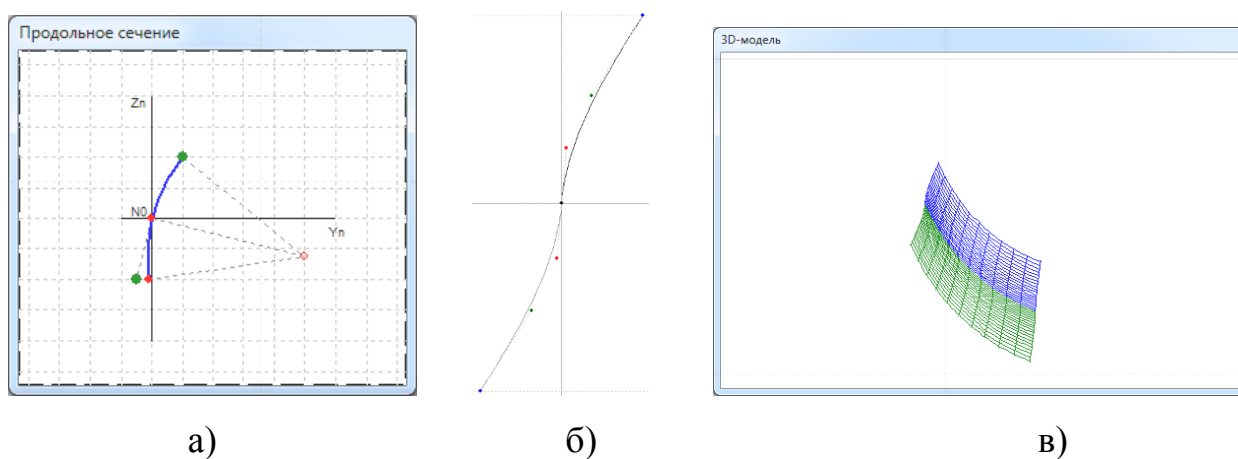


Рис. 5.14. Зміна кута нахилу і форми дуги за допомогою дотичної до дуги і положення кінцевої точки: а – інтерактивне керування направляючою, що описує поздовжньою лінією зуба; б – кривоюа Безьє 3-го порядку, що описує профіль зуба; в – вікно 3D-моделі твірної поверхні

5.2.3. Програмне забезпечення «APACE» для апроксимації масиву точок кривими Безьє 3-го порядку

Програмне забезпечення «APACE» призначене для апроксимації масиву точок кривими Безьє 3-го порядку [233]. В даний час існує велика різноманітність функцій та їх комбінацій для опису координатних ліній, що визначають геометрію складних поверхонь в криволінійній системі координат. Це ускладнює розробку єдиного математичного опису функціональних поверхонь, що залежить від великої кількості керуючих параметрів.

Для приведення теорії поверхонь, математичного та програмного забезпечення до єдиного вигляду постало завдання апроксимації існуючих кривих, що описують координатні лінії, до єдиного уніфікованого вигляду. В якості уніфікованої кривої була обрана сплайнова крива Безьє 3-го порядку.

Будь-яку криву можна представити в системі координат у вигляді масиву точок. Алгоритм розв'язання задачі апроксимації побудований на тому положенні, що необхідно мінімізувати відхилення точок від кривої Безьє. До програми підключена бібліотечна програма, що дозволяє вирішувати задачу мінімізації методом головних осей.

Метод головних осей розроблений Р.П. Брентом [273], і є одним з методів серед сімейства методів оптимізації, які не потребують інформації про градієнт функції. Основою методу є наступна схема: нехай є набір лінійно-незалежних векторів в просторі аргументів функції. В якості стартового набору можна використовувати стовпці одиничної матриці. Завдання мінімізації функції N аргументів зводиться до серії одновимірних мінімізацій уздовж напрямків, заданих векторами з набору параметрів.

Після мінімізації уздовж N прямих, заданих N векторами, програма переходить з початкової точки A_0 в точку A_1 . Потім додається до набору векторів зміщення з точки A_0 в A_1 , і забирається один зі старих векторів, щоб знову був набір з N векторів. До отриманого набору векторів застосовується

Після активації команди «Побудувати» програма відображає точки і графіки функцій, де червоним кольором виділена ламана, що з'єднує точки, а зеленим шукана крива Безьє 3-го порядку (рис. 5.16).

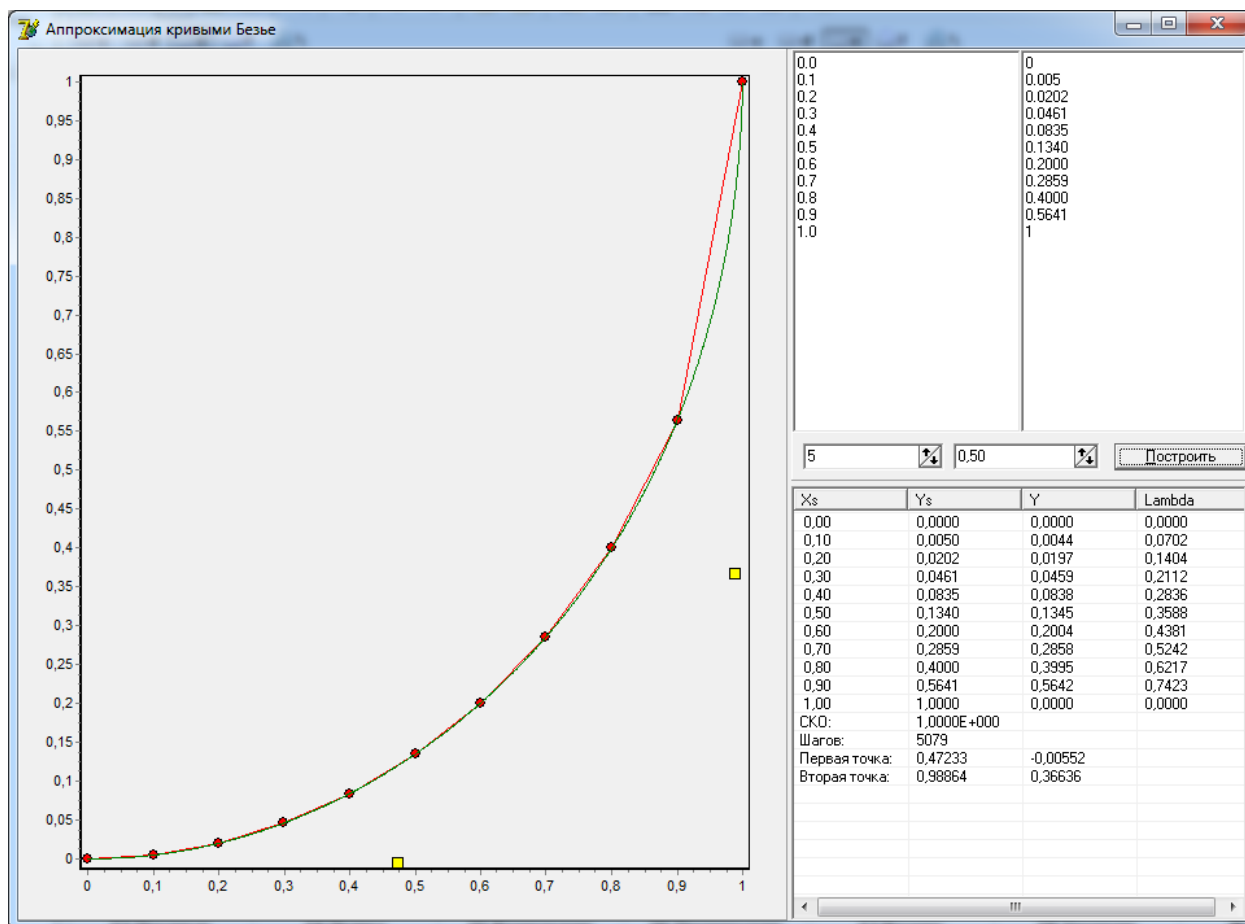


Рис. 5.16. Побудова за точками ламаної і апроксимація кривою Безьє у середовищі «APACE» [233]

Крім цього, у вікні програми відображаються задані y_s і отримані координати y для заданих координат x_s і відповідні їм поточні значення параметра λ кривої Безьє:

X_s	Y_s	Y	Λ
0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,10	0,0050	0,0044	0,0702
0,20	0,0202	0,0197	0,1404
0,30	0,0461	0,0459	0,2112
0,40	0,0835	0,0838	0,2836
0,50	0,1340	0,1345	0,3588
0,60	0,2000	0,2004	0,4381
0,70	0,2859	0,2858	0,5242
0,80	0,4000	0,3995	0,6217
0,90	0,5641	0,5642	0,7423
1,00	1,0000	0,0000	0,0000

Так як координати початкової та кінцевої точки задаються, необхідно визначити тільки координати двох керуючих точок кривої Безьє, які однозначно визначають її положення в плоскій системі координат. Ці значення розраховуються і виводяться на екран:

Первая точка:	0,47233	-0,00552
Вторая точка:	0,98864	0,36636

Теорія і особливості застосування апроксимації точок, що описують профіль твірної поверхні описані в підрозділі 2.4 та роботі [4].

Отримані результати передаються для розрахунку робочих поверхонь зубців, поверхні зачеплення, геометричних та кінематичних показників. В роботі показано, як ці результати використовувалися для визначення контактних точок гіперболоїдного зачеплення (п. 3.4 та п. 5.3.5).

5.2.4. Програмне забезпечення «SCOT» для визначення контактних точок функціональних поверхонь

Програмне забезпечення «SCOT» призначене для синтезу контактних точок функціональних поверхонь [237]. При синтезі та аналізі просторових зачеплень, таких, як гіперболоїдні передачі, складно побудувати комп'ютерні моделі зубців і проаналізувати умови взаємодії. Використовуючи запропоновану теорію, в якій профіль твірної поверхні описує сплайнову криву Безьє 3-го порядку, вдалося вирішити цю задачу.

Математичне забезпечення дозволило розробити програму для синтезу

контактних точок в просторовій системі координат.

На рис. 5.17. представлений інтерфейс програми «SCOT».

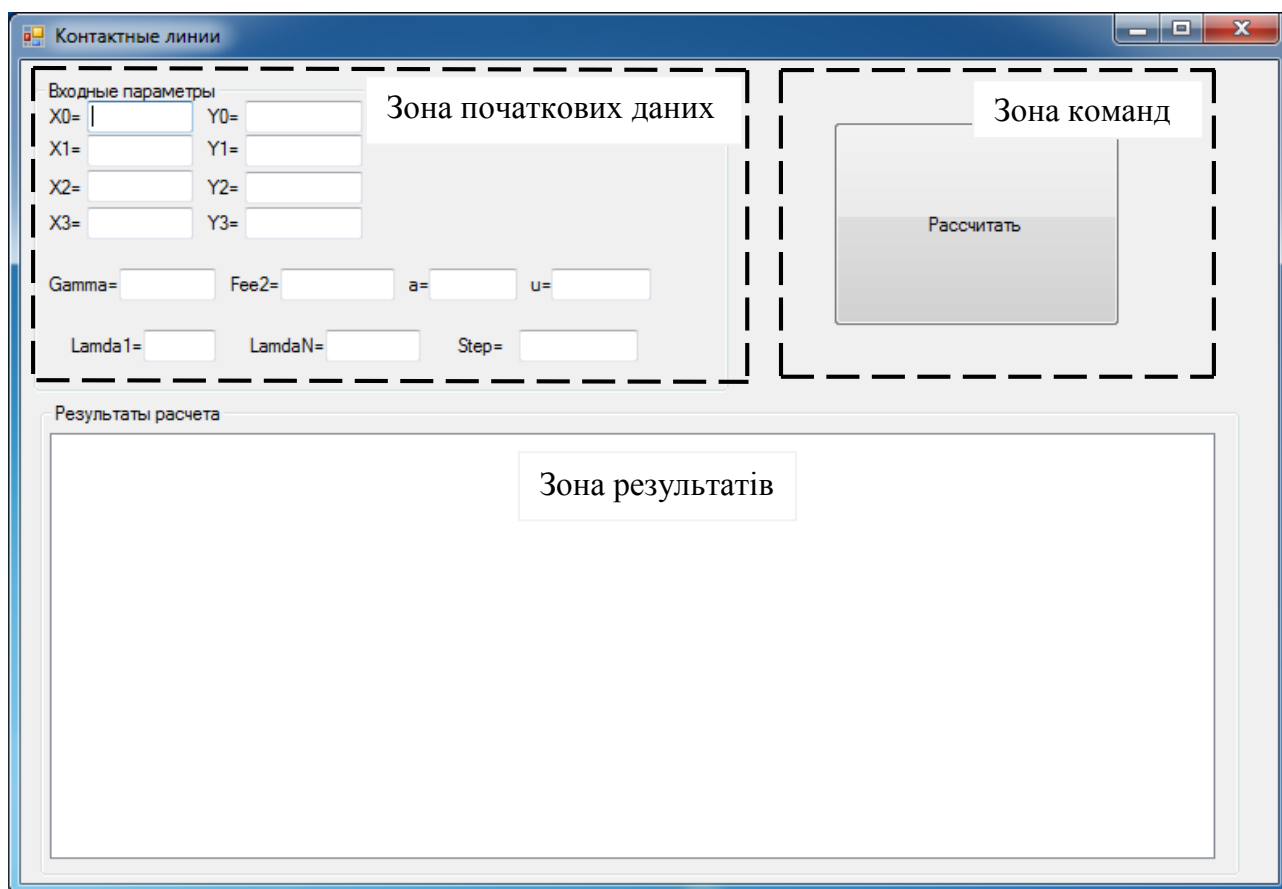


Рис. 5.17. Початковий інтерфейс програми «SCOT» [237]

Вхідними параметрами даної програми є координати керуючих точок кривої Безьє 3-го порядку, які можна взяти з комп'ютерної програми «APACE» (п. 5.2.3) або з інших джерел:

Входные параметры	
X0=	-48,999
Y0=	0,326
X1=	-49,616
Y1=	0,149
X2=	-50,282
Y2=	-0,087
X3=	-50,999
Y3=	-0,398

Також потрібно задати кут схрещування осей γ , кут повороту колеса в даний момент φ_2 , міжосьова відстань a і передавальне відношення u :

Gamma=	2,08	Fee2=	0	a=	70,5	u=	0,2
--------	------	-------	---	----	------	----	-----

Крім того, задаються значення початкового та кінцевого параметра кривої Безьє і крок його зміни:

Lamda1= 0 LamdaN= 1 Step= 0,1

Після введення вихідних даних необхідно натиснути кнопку «Розрахувати». Результати розрахунку виводяться на екран (рис. 5.18) і зберігаються в текстовому файлі (рис. 5.19):

Входные параметры

X0= -48,999 Y0= 0,326
X1= -49,616 Y1= 0,149
X2= -50,282 Y2= -0,087
X3= -50,999 Y3= -0,398

Gamma= 2,08 Fee2= 0 a= 70,5 u= 0,2

Lamda1= 0 LamdaN= 1 Step= 0,1

Рассчитать

Результаты расчета

Xk = -48,999 Yk = 0,326 Zk = -2,978	Xg= 21,501 Yg= 2,441 Zg= 1,736	Xo= -48,999 Yo= 0,326 Zo= -2,978
Xk = -49,186 Yk = 0,271 Zk = -2,316	Xg= 21,314 Yg= 1,89 Zg= 1,365	Xo= -49,186 Yo= 0,271 Zo= -2,316
Xk = -49,375 Yk = 0,213 Zk = -1,7	Xg= 21,125 Yg= 1,381 Zg= 1,014	Xo= -49,375 Yo= 0,213 Zo= -1,7
Xk = -49,568 Yk = 0,15 Zk = -1,125	Xg= 20,932 Yg= 0,909 Zg= 0,68	Xo= -49,568 Yo= 0,15 Zo= -1,125
Xk = -49,763 Yk = 0,084 Zk = -0,585	Xg= 20,737 Yg= 0,469 Zg= 0,359	Xo= -49,763 Yo= 0,084 Zo= -0,585
Xk = -49,962 Yk = 0,014 Zk = -0,074	Xg= 20,538 Yg= 0,058 Zg= 0,049	Xo= -49,962 Yo= 0,014 Zo= -0,074
Xk = -50,163 Yk = -0,06 Zk = 0,41	Xg= 20,337 Yg= -0,329 Zg= -0,252	Xo= -50,163 Yo= -0,06 Zo= 0,41
Xk = -50,367 Yk = -0,138 Zk = 0,871	Xg= 20,133 Yg= -0,693 Zg= -0,545	Xo= -50,367 Yo= -0,138 Zo= 0,871
Xk = -50,575 Yk = -0,22 Zk = 1,312	Xg= 19,925 Yg= -1,038 Zg= -0,832	Xo= -50,575 Yo= -0,22 Zo= 1,312
Xk = -50,785 Yk = -0,307 Zk = 1,736	Xg= 19,715 Yg= -1,366 Zg= -1,114	Xo= -50,785 Yo= -0,307 Zo= 1,736
Xk = -50,999 Yk = -0,398 Zk = 2,144	Xg= 19,501 Yg= -1,678 Zg= -1,393	Xo= -50,999 Yo= -0,398 Zo= 2,144

Рис. 5.18. Приклад результату розрахунку координат контактних точок

ЛО_2.txt - Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

21. 501	2. 44127084761238298068	1. 73636305207117245743
21. 314428	1. 89001275784713070717	1. 36572712361257703166
21. 124904	1. 38069127006331192294	1. 01434066034787280503
20. 932416	0. 908987517645213144021	0. 679682430999355259302
20. 736952	0. 469709500997613369928	0. 35874372218698551693
20. 5385	0. 0576652205252916001908	0. 0485158205307247003566
20. 337048	-0. 328844791448943099684	-0. 252060058940128630658
20. 132584	-0. 693266268561296697181	-0. 545017665400944635012
19. 925096	-1. 03817181146846764329	-0. 831903265924759112273
19. 714572	-1. 366134020827154389	-1. 11426312758460786201
19. 501	-1. 6779792313350403523	-1. 39266855324885796514

Рис. 5.19. Приклад текстового файлу з результатами розрахунку

Теорія і особливості застосування синтезу контактних точок зубчастого зачеплення описані в п. 3.3 і в роботі [50].

Текстовий файл з координатами контактних точок вводиться в систему твердотільного і поверхневого моделювання, таку, як PowerShape, де відбудовуються контактні точки. Далі ці точки об'єднуються в контактні лінії, а лінії у поверхні. Причому, в залежності від системи координат, в якій розглядаються поверхні, відповідно, виходять робочі поверхні зубців шестерні і колеса, поверхня зачеплення.

Після цього можна аналізувати умови взаємодії зубців, розглядати геометричні та кінематичні показники передачі, створювати еталонні комп'ютерні моделі зубчастих коліс.

5.2.5. Програмне забезпечення «SAlAT» для комплексного параметричного моделювання систем і процесів формоутворення

Програмне забезпечення «SAlAT» призначене для комплексного параметричного моделювання систем і процесів формоутворення складних поверхонь [236]. Воно засноване на запропонованому автором уніфікованому математичному описі профілю твірної поверхні для формоутворення зубчастих коліс. Це опис виконано на основі теорії сплайнів. У програмі також використовуються математичні залежності для визначення геометричних і кінематичних показників синтезованих зубчастих зачеплень. Крива Безьє 3-го порядку дозволяє інтерактивно управляти синтезом зачеплення для отримання необхідного результату.

До розробленого програмного забезпечення «SAlAT» було підготовлено опис (додаток Б) [24], який включає блок-схему (рис. Б.1), опис інтерфейсу, способи керування синтезом.

Методика, алгоритм і приклади використання програмного забезпечення «SAlAT» викладені в роботах [27], [62], [65], [66], [89].

5.3. Інтеграція з системами CAD/CAM/CAI

Сьогодні так звана «технічна» епоха, що характеризується тенденціями нарощування обсягів виробництва, поступила місцем епосі «технологічної», головною характеристикою якої є якість продукції при низькій собівартості та широкій номенклатурі [78].

Фахівці США, Англії, Японії лідируючу роль віддають питань вдосконалення технологій, в тому числі інформаційних, витрачаючи при цьому близько 60% промислових інвестицій на їх розвиток.

5.3.1. Інтеграція з CAD-системами

На даний час автоматизація конструкторської підготовки виробництва, що охоплює всі рівні параметричного проектування і оформлення технічної документації, широко представлена в САПР.

Конструктивного уявлення і опису деталі недостатньо для технологічного проектування. Автоматизований перехід від конструкторських систем створення та аналізу твердотільних комп'ютерних моделей до систем автоматизованого проектування технологічних процесів дозволить значно скоротити витрати робочого часу технолога на підготовку вихідної інформації, а в деяких випадках повністю перекласти її на інтегровані комп'ютерні системи, одночасно розширюючи область прийняття оптимальних рішень в задачах технологічного проектування.

У техніці широко використовуються деталі, форма яких має складну геометрію. Процес створення деталей складної форми включає кілька етапів [211]. На першому етапі розробляється твердотільна модель деталі, яка служить основою для всіх наступних етапів. На другому етапі твердотільна модель піддається всебічному аналізу і вибирається оптимальний варіант. В подальшому за отриманою моделлю генеруються програми і здійснюється багатокоординатна обробка на верстатах з ЧПК.

Існують різні способи отримання комп'ютерних моделей складних

поверхонь: аналітичний, графоаналітичний (метод копіювання) і графічний (метод обкочування).

При використанні аналітичного методу виводиться система рівнянь, розв'язання якої дозволяє визначати координати точок поверхні. Отримані чисельні значення координат використовуються як параметри твердотільної моделі.

Сутність графічного методу полягає в тому, що будується ріжучий профіль інструменту і, з його допомогою, здійснюється покрокове видалення матеріалу. Метод імітує обкочування інструменту, може служити для технологічного аналізу, але вимагає значних комп'ютерних ресурсів.

Графоаналітичний метод аналогічний методу копіювання при нарізанні зубців в виробничих умовах. Аналітично визначається огинаюча різальної кромки інструменту у відносному русі навколо колеса, яка слугує основою для видалення необхідного обсягу моделі.

Алгоритм створення твердотільної моделі полягає в тому, що спочатку створюється базова модель заготовки, для чого вибирається координатна площина, в якій будується необхідний контур колеса. Далі, за допомогою операцій переміщення контуру, виходить об'ємна твердотільна модель заготовки. Наступний етап полягає в тому, що одним з перерахованих вище методів здійснюється видалення зайвого обсягу.

Наприклад, значна частина всіх відмов тягових передач локомотивів викликана коливанням динамічних навантажень, неправильним врахуванням нерівномірності розподілу навантаження за шириною зубчастих коліс внаслідок перекосу їх осей, що пов'язано перш за все з істотними конструктивними недоліками цього вузла [93]. У консольних тягових передачах тепловозів кут перекосу осей через великі зазори в моторно-осьових і якірних підшипниках, а також з-за деформації осі колісної пари і валу якоря може досягати 30'.

Для підвищення навантажувальної здатності, довговічності і поліпшення кінематичних властивостей тягової передачі тепловоза 2ТЕ10Л,

що працює в умовах нестабільного положення осей, була запропонована передача [200], що має поздовжню модифікацію зубців коліс. Для аналізу геометрії та кінематики цієї передачі за допомогою CAD-системи були розроблені твердотільні моделі зубчастих коліс. На рис. 5.20 наведені моделі модифікованих зубців тягової передачі.

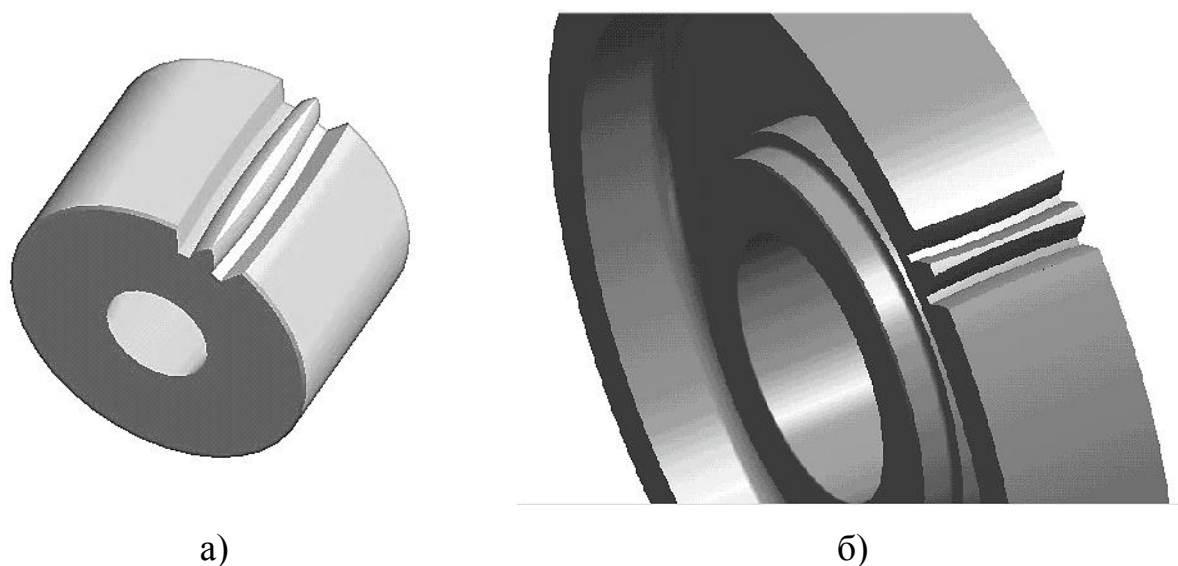


Рис. 5.20. Твердотільні моделі двоопуклого зуба (а) шестерні і двоввігнутого зуба (б) колеса тягової передачі

В роботі [199] запропонований спосіб оброблення бочкоподібних зубців, що враховує відносний перекис осей зубчастих коліс. На рис. 5.21 представлені системи координат, що характеризують запропоновану схему формоутворення.

Система координат X_n, Y_n, Z_n пов'язана з твірною поверхнею рейкового типу, система X_l, Y_l, Z_l пов'язана з оброблюваним зубчастим колесом. Для простоти побудови математичної моделі введені допоміжні системи координат, що характеризують елементарні переміщення та обертання однієї системи координат відносно іншої. При виведенні математичних залежностей використані елементи векторної алгебри, теорії матриць, векторного аналізу та теорії поверхонь.

Матриці переходу між системами координат, що відображають елементарні відносні переміщення і обертання, мають верхні індекси,

причому M^1, M^2, M^3 – матриці 4-го порядку, що описують відповідно відносні елементарні переміщення уздовж осей X, Y, Z , а матриці M^4, M^5, M^6 – обертання навколо тих же осей. Кут φ_1 характеризує поворот колеса навколо своєї осі; α – кут нахилу лінії зачеплення, яка лежить в площині відносного перекосу осі колеса; кут β характеризує поворот осі колеса навколо початку системи координат. Спільно з лінійним переміщенням l колеса уздовж осі обертання цей кут дозволяє управляти радіусом поздовжньої кривизни бочкоподібного зуба. R_1 – радіус ділильного кола зубчастого колеса; S – переміщення твірної поверхні відносно нерухомої системи координат X_6, Y_6, Z_6 .

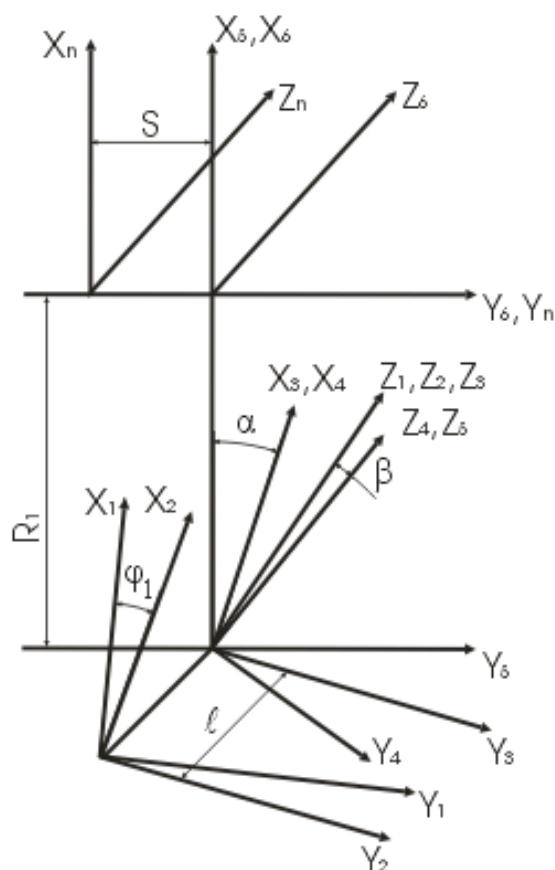


Рис. 5.21. Системи координат при нарізанні бочкоподібного зуба колеса

Математичну модель поверхні зуба можна отримати, розв'язавши спільно систему трансцендентних рівнянь, що складаються з функції

формоутворення і рівнянь зв'язків [93].

Функція формоутворення має такий вигляд:

$$\bar{r}_1 = M^6(\varphi_1)M^3(l)M^4(-\beta)M^6(-\alpha)M^1(R_1)M^2(-S)\bar{r}_n$$

де $\bar{r}_n = M^6(\alpha)M^1(x)M^3(z)\bar{e}_4$ – радіус-вектор твірної поверхні.

Тут

$$\bar{e}_4 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} -$$

– одиничний вектор, що характеризує початок системи координат, розташованої в довільній точці інструментальної поверхні.

Функціональні зв'язки описуються двома рівняннями. Рівняння

$$l = (R_k - R_1 \sin \alpha)(1 - \cos \beta) / \sin \beta$$

пов'язує параметри l і β для отримання бочкоподібної поверхні зуба з радіусом кривизни R_k у поздовжньому перетині.

$S = R_1 \varphi_1$ – рівняння, що характеризує передавальне відношення.

При формоутворенні бочкоподібної поверхні зубців використовувалося двопараметричне огинання. Тому в систему рівнянь додається два рівняння, що характеризують зв'язки огинання:

$$\frac{\partial \bar{r}_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial z} \cdot \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial \beta} = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{r}_1}{\partial x} \cdot \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial z} \cdot \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial \varphi_1} = 0,$$

Для вирішення системи рівнянь і отримання поверхні бочкоподібного зуба використовувався математичний пакет Maple (рис. 5.22).

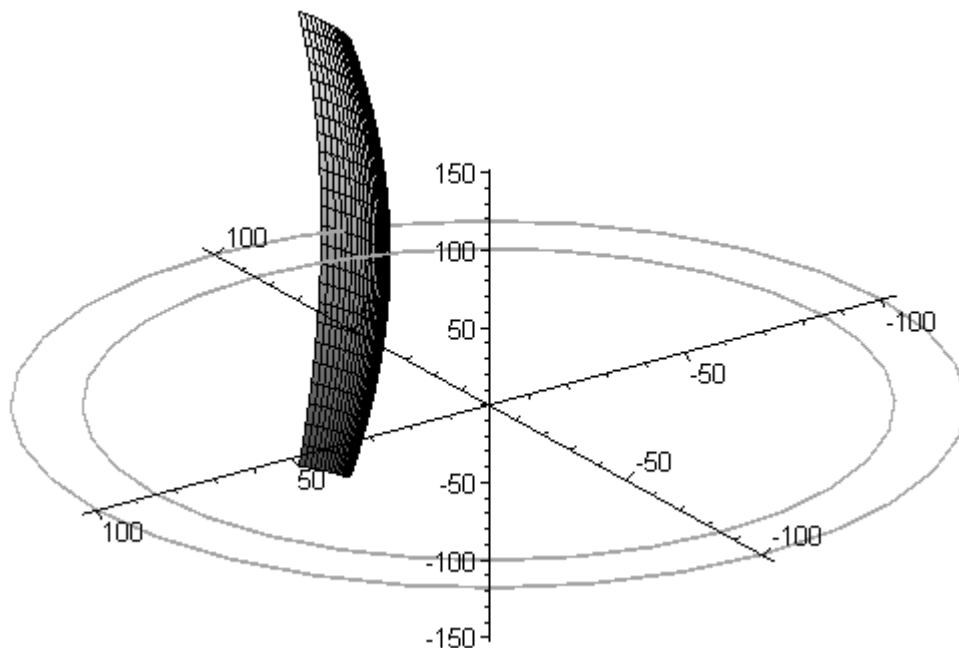


Рис. 5.22. Поверхня бочкоподібного зуба

У загальному вигляді отриману математичну модель поверхні бочкоподібного зуба можна представити у вигляді радіус-вектору

$$\bar{r}_1 = \bar{f}(R_l, \alpha, R_k, x, z).$$

Змінюючи параметри α та R_k , можна отримати різну форму поздовжньої модифікації зубців для різних розмірів зубчастих коліс R_l . Змінні x та z визначають твірну поверхню.

Для використання результатів математичного моделювання при створенні тривимірної твердотільної моделі зубчастого колеса (рис. 5.23) за допомогою середовища програмування Delphi була створена прикладна бібліотека для системи КОМПАС-3D, що дозволяє автоматизувати процес створення твердотільної моделі по перетинах з вихідними даними, отриманими в Maple.

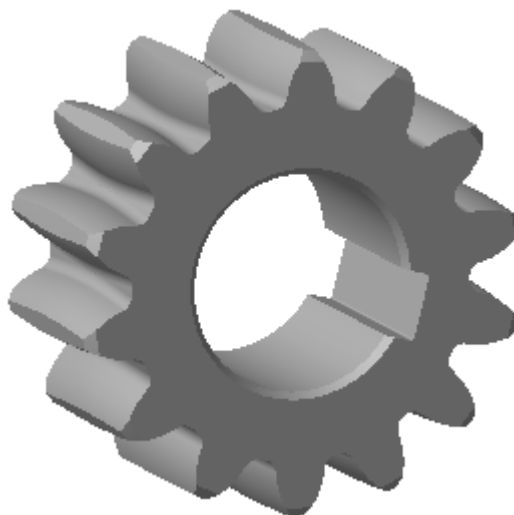


Рис. 5.23. Твердотільна модель зубчастого колеса

Алгоритм створення комп'ютерної моделі гіперболоїдного інструменту аналогічний процесу його виготовлення [80]. Заготовка гіперболоїдного інструменту має вигляд однополостного гіперболоїда. Такі заготовки можуть бути виготовлені за копіром або за допомогою дискового різця. При цьому діаметр різця повинен дорівнювати діаметру западин прямозубого циліндричного колеса, а їх обертання повинно бути кінематично пов'язано.

Розробимо комп'ютерну модель шестнадцятизахідної гіперболоїдної фрези, наведеної в роботі [48], з $m_n=1$ мм та кутом підйому витка 15° для обробки прямозубого циліндричного колеса з $z_1=76$.

Профіль зуба твірного колеса можна отримати графічно, як огинаючу сімейства профілів твірної поверхні рейкового типу (рис. 5.24).

Далі алгоритм моделювання полягає в наступному, в певній CAD-системі в глобальній системі координат будуються допоміжні площини і осі. Всі побудови можна виконати в будь-якій промисловій CAD-системі. Перша допоміжна площина жорстко пов'язана із заготовкою інструменту. Обертання заготовки визначається кутом повороту цієї площини щодо осі z глобальної системи координат.

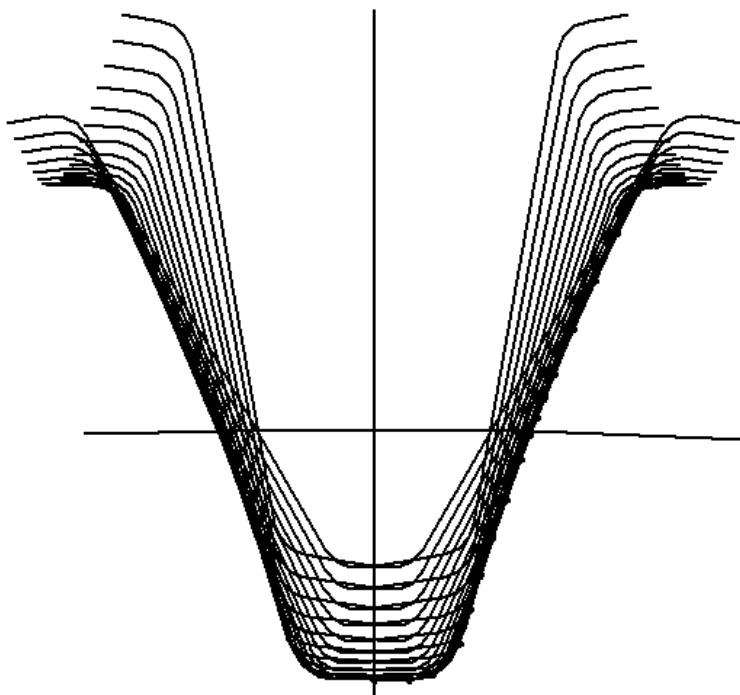


Рис. 5.24. Огинаюча сімейства профілів

Друга допоміжна площина проведена під прямим кутом до першої і визначає положення третьої площині, яка знаходиться на відстані, рівній міжосьовій відстані верстатного зачеплення. Цю відстань можна редагувати в процесі моделювання інструментів в залежності від конкретного завдання.

У третій площині будується допоміжна вісь твірного колеса під кутом схрещування зачеплення до осі z глобальної системи координат. Перпендикулярно цій осі будується середня площина твірного колеса, в якій буде розташовуватися профіль твірного зуба.

На рис. 5.25 показана заготовка інструменту, допоміжні площини і осі. Профіль зуба твірного колеса може повертатися в своїй площині на кут, кінематично пов'язаний з кутом повороту заготовки інструменту. Після копіювання профілю зуба в середню площину твірного колеса під потрібним кутом здійснюється операція «вирізати елемент видавлювання», яка імітує перший прохід видалення матеріалу заготовки.

На рис. 5.25 показаний результат видалення матеріалу, коли кути повороту заготовки та інструменту дорівнюють нулю. На будь-якому кроці

можна змодельовати і розрахувати обсяг матеріалу, який видаляється і його масу.

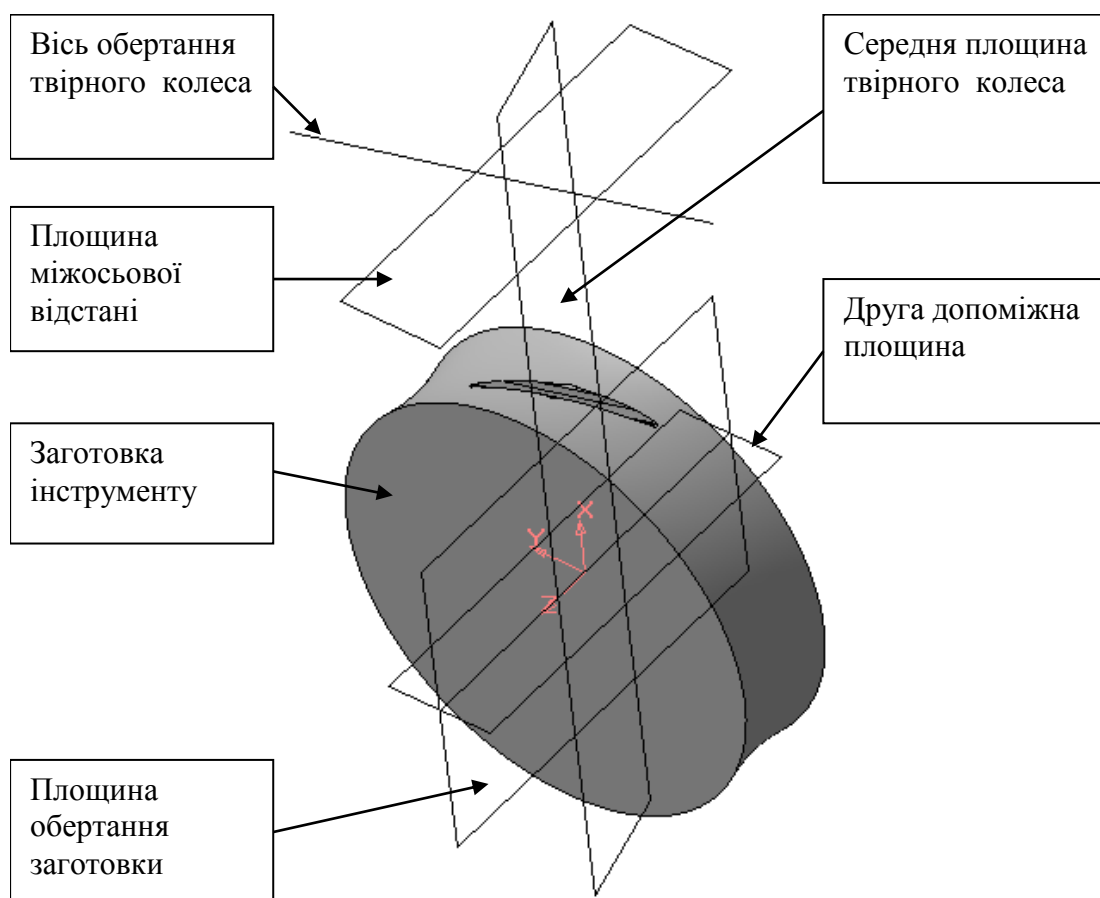


Рис. 5.25. Заготовка інструменту з допоміжними побудовами

Погоджено повертаючи заготовку і твірне колесо, повторюємо цю операцію необхідну кількість разів, моделюючи кожен прохід інструменту. На рис. 5.26 показана перша впадина інструменту, отримана таким способом.

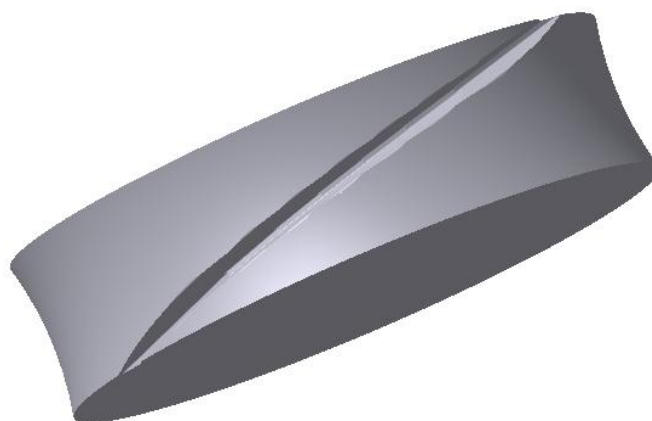


Рис. 5.26. Побудова першої впадина інструменту видавлюванням

Використовуючи операцію «масив по концентричній сітці», отримуємо необхідну кількість витків інструмента (рис. 5.27).



Рис. 5.27. Побудова шістнадцяти витків як масиву

Для отримання комп'ютерної моделі фрези необхідно «прорізати» стружкові канавки. Для цього створюємо під заданим кутом додаткову площину, в якій будуємо профіль дискової фрези. Використовуючи операцію «вирізати елемент видавлювання», створюємо першу канавку, а за допомогою операції «масив по концентричній сітці» завершуємо створення комп'ютерної моделі гіперболоїдного інструменту (рис. 5.28).

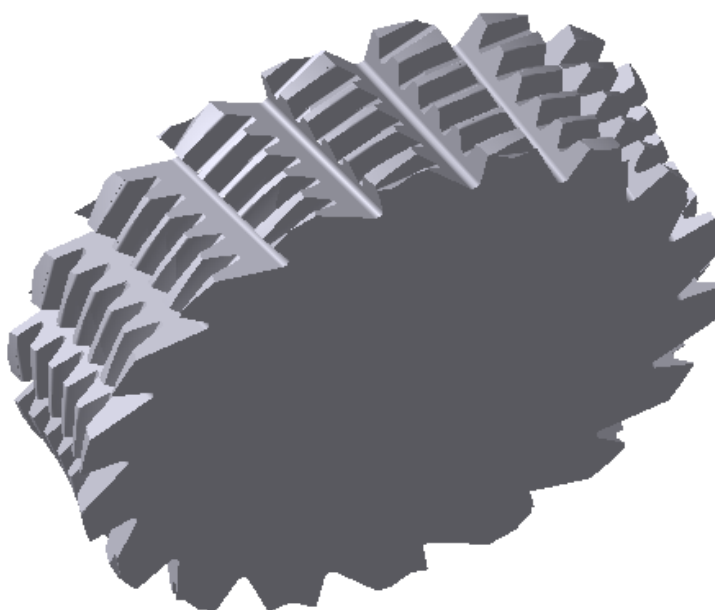


Рис. 5.28. Модель після прорізання масиву стружкових канавок

На рис. 5.29 показаний процес формування огинаючої та огортаючої кривих [77]. Під час формування западини зуба, огинаючі різальні кромки інструменту перетинаються в точках вершин оброблюваної поверхні. Координати цих точок не складно отримати як аналітичними методами, прирівнявши рівняння кривих, так і графічно, використовуючи систему прив'язок в середовищі комп'ютерної графіки. Крива, проведена через точки перетину, утворює лінію вершин, тобто найбільш піднесені точки западини зуба. Крива, що огинає миттєві положення різальної кромки інструменту, визначає нижню межу западини. Тому доцільно, щоб згладжуюча крива Безьє займала б проміжне місце, що легко забезпечити як аналітично, так і графічно.

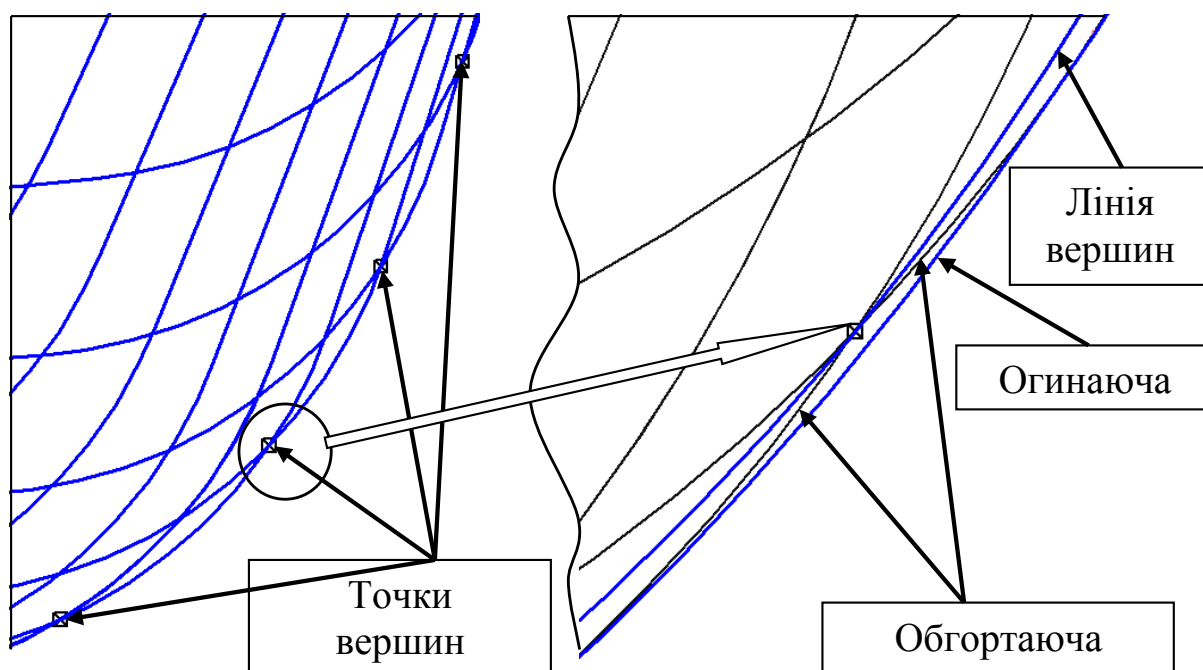


Рис. 5.29. Визначення згладжує кривої

У багатьох випадках твірні поверхні та поверхні зубців можна отримати рухом розглянутої кривої за заданою траєкторією. Такі поверхні називають поверхнями руху. Поверхні руху в якості даних містять утворюючу криву і в тому чи іншому вигляді направляючу лінію. У загальному випадку направляючою може бути довільна крива. Серед різних

напрямних в зубчастих зачепленнях широке застосування знайшли пряма лінія (прямозубі циліндричні колеса і твірні поверхні), гвинтова лінія (косозубі та гвинтові передачі) і дуги кола (передачі з круговим зубом). Якщо направляючою слугує відрізок прямої, то в CAD-системах таку поверхню називають поверхнею видавлювання, якщо дуга кола – то поверхнею обертання. У всіх інших випадках виходять кінематичні поверхні. Для створення твердотільних еталонних моделей, обмежених такими поверхнями, в CAD-системах є спеціальні операції, тому це завдання вирішується легко.

При створенні твердотільних моделей гіперболоїдних інструментів ці методи не підходять, так як в кожному нормальному перерізі ми маємо різну твірну криву. Поверхні такого роду, наприклад, корпуси суден, фюзеляжі і крила літаків часто проектують за допомогою поперечних або поздовжніх перерізів, що проходять в заданих місцях. Ці перерізи з'єднуються плавними кривими, в результаті чого виходить єдина тривимірна форма. Раніше це виконувалося в натуральну величину, для чого використовувалися плази. За традицією процес побудови поверхні по її перетинах називається плазуванням, а поверхні, побудовані таким способом – сплайновими поверхнями. Окремим випадком таких поверхонь є поверхні Безьє, які можна узагальнити так, щоб вони могли описати необхідну частину поверхні другого порядку – еліпсоїда, гіперболоїда, параболоїда або їх окремих випадків.

На рис. 5.30 показаний процес формоутворення твердотільної моделі западини зуба гіперболоїдна інструменту за перерізами. Спочатку модель заготовки інструменту розтинають паралельними площинами із заданим кроком. В кожному перерізі за викладеною методикою будується згладжуюча крива Безьє западини зуба і створюється модель.

При виготовленні гіперболоїдного зубчастого колеса профіль поверхні твірної колеса часто є результатом огинання первинної твірної поверхні. Однак не завжди огинаюча сімейства твірних поверхонь збігається з реальною поверхнею, отриманою на верстаті. Це може відбуватися або через

наявність ребер повернення, або через самоперетинання обвідної, або з інших причин. Тому, поряд з диференціальними методами отримання обвідної, доцільно використовувати і недиференціальні методи. Проф. Шевельова Г.І. у своїй монографії [257] вводить поняття огортаючої: «Обволакивающая семейства тел – это граница множества точек, каждая из которых принадлежит хотя бы одному телу семейства».

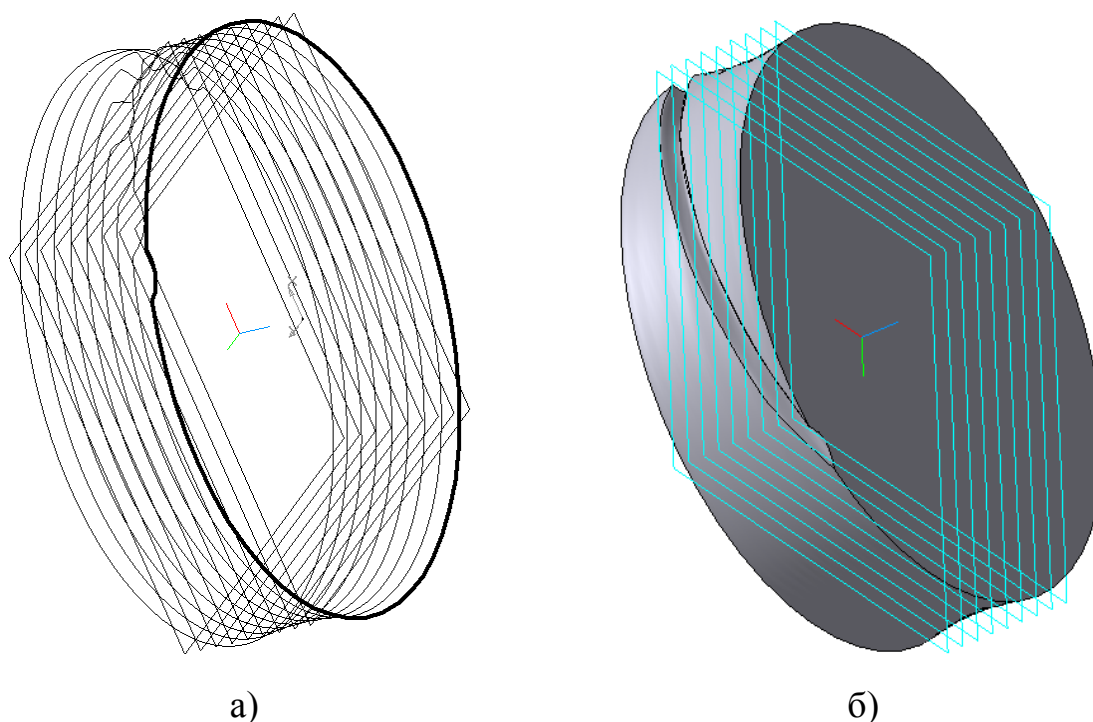


Рис. 5.30. Побудова западини зуба за перерізами:

- а) побудова кривої, яка описує западину зуба в кожному перерізі;
- б) формоутворення западини зуба моделі за перерізами

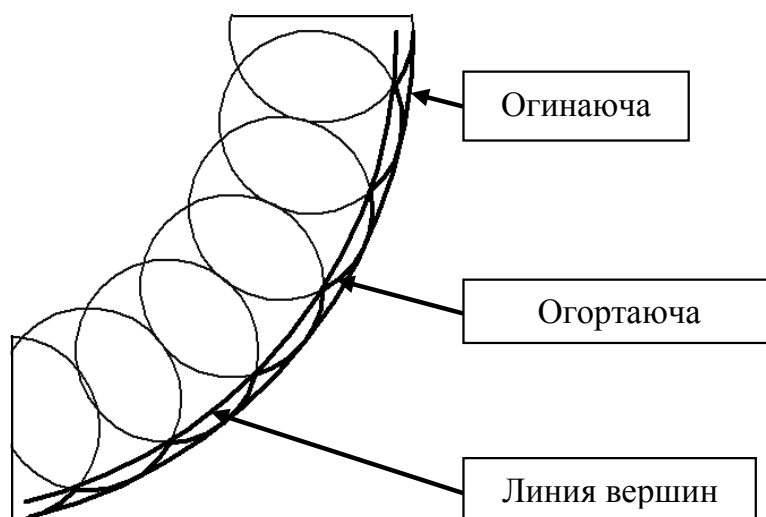


Рис. 5.31. Визначення граничних відхилень

На рис. 5.31 показано, як утворюються огибаюча та огортаюча сімейства кіл. Також показана крива, що проходить через лінію вершин оброблюваної поверхні. В ідеальному випадку, після припрацювання, отриманий профіль повинен знаходитися між огибаючою та лінією вершин. В реальності додається цілий ряд факторів, який впливає на кінцевий результат. Проте, в будь-якому випадку можна визначити поле допуску, всередині якого повинна розташовуватися шукана крива. Так, наприклад, згідно з ГОСТ 9324-80 для фрези черв'ячної чистової однозаходної класу точності AAA і модуля від 1 мм до 2 мм, для нарізання циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем, допуск на профіль зуба, тобто відстань по нормалі між двома номінальними профілями, що обмежують дійсний профіль, виміряний в заданому перерізі в межах робочої ділянки зуба ff_0 не повинно перевищувати 3 мкм.

Для того, щоб диференціальними методами можна було аналізувати результати синтезу, крива, яка перебуває всередині поля допуску, повинна бути гладкою та двічі диференційованою [82]. Чи не маловажним фактором може виступати і можливість інтерактивного керування формою кривої, з подальшим візуальним аналізом показників, що характеризують можливість її використання. У монографії [107] наводиться детальний аналіз кривих і поверхонь, широко використовуваних як складовий елемент математичного

ядра при розробленні програмного забезпечення сучасних систем CAD/CAM/CAE.

В роботі [67] розглядається спосіб інтерактивного синтезу, коли для керування кривою, яка описує робочу ділянку зуба колеса, використовується крива Безьє 3-го порядку. На рис. 5.32 показано, як графічним методом, прямо на екрані монітора, можна вписати таку криву між огинаючою і лінією вершин. Тут P_0 , P_3 – опорні точки, які розташовуються всередині поля допуску, причому крива може складатися з декількох ділянок, для яких кінцева опорна точка однієї ділянки є початковою опорною точкою наступної ділянки. Ділянки можна стикувати так, що в спільній для обох ділянок кривої Безьє точці будуть спільна дотична і однаковий радіус кривизни.

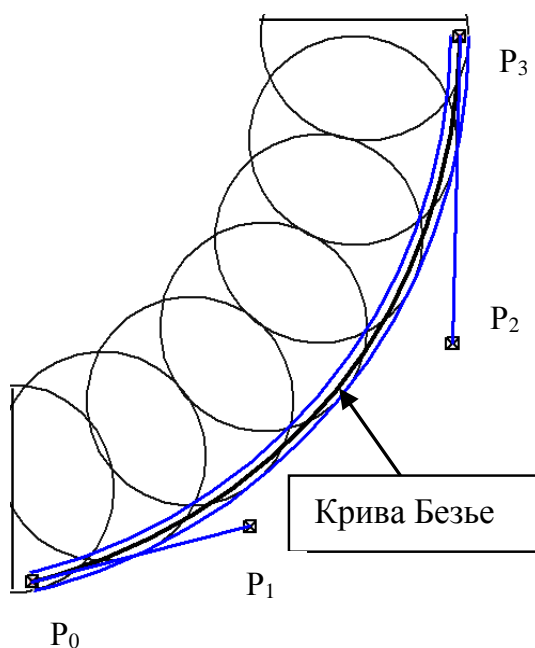


Рис. 5.32. Побудова сплайнової кривої

Слід зазначити, що чим менше буде таких ділянок, тим простіше буде керувати формою кривої Безьє при синтезі спряжених профілів зубців. Точки P_1 , P_2 є керуючими, захоплюючи і переміщаючи їх курсором на екрані монітора, можна керувати формою кривої, причому точність апроксимації графічним методом досить висока. Так, для модуля 1 мм для різних контурів твірної поверхні крива Безьє вписувалася в поле допуску 0,5 мкм, що в 6 разів точніше, ніж в наведеному вище стандарті.

На рис. 5.33 показана твердотільна комп'ютерна модель зачеплення зуба циліндричного колеса і западини між зубцями гіперболоїдного колеса, отримана за перерізами описаним вище методом.

У наведеній моделі евольвентний профіль зуба колеса був отриманий запропонованим методом, коли огинаюча твірної поверхні рейкового типу зі стандартним вихідним контуром була замінена кривою Безьє 3-го порядку. Заготовка типу «однопорожнинний гіперболоїд» була розбита з однаковим кроком сімейством площин, паралельних торцю заготовки. Причому крок між паралельними площинами задавався у вигляді параметра, яким можна керувати.

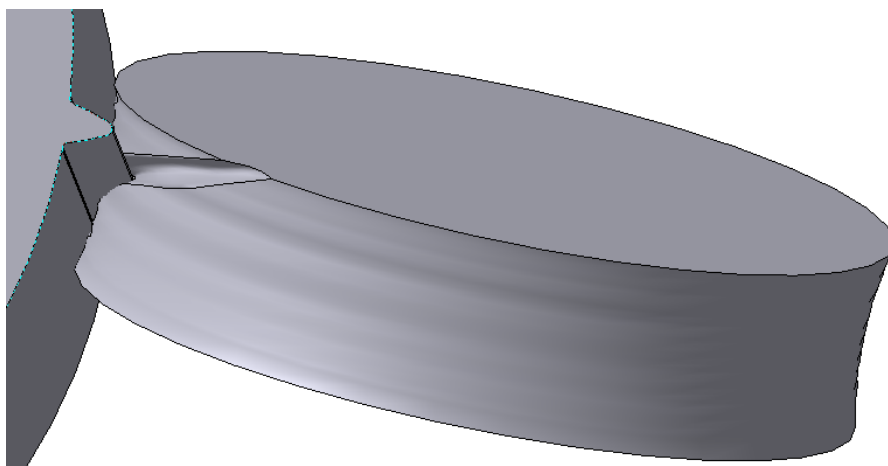


Рис. 5.44. Ілюстрація взаємодії одного зуба з западиною другого

У кожній січній площині визначалася огортаюча крива, форма якої залежала від заданої кількості проходів різальної кромки інструменту при обкочуванні інструменту і колеса. Отримана крива замінювалася кривою Безьє 3-го порядку, яка і слугувала основою для побудови западини зубців гіперболоїдного колеса. Використовуючи операцію «побудова масиву по концентричній сітці», створювалася необхідна кількість зубців.

При використанні розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення інформація про геометрію формоутворюючих та формостворюваних елементів може автоматично передаватися в будь-яку універсальну CAD-систему для автоматичного редагування існуючих

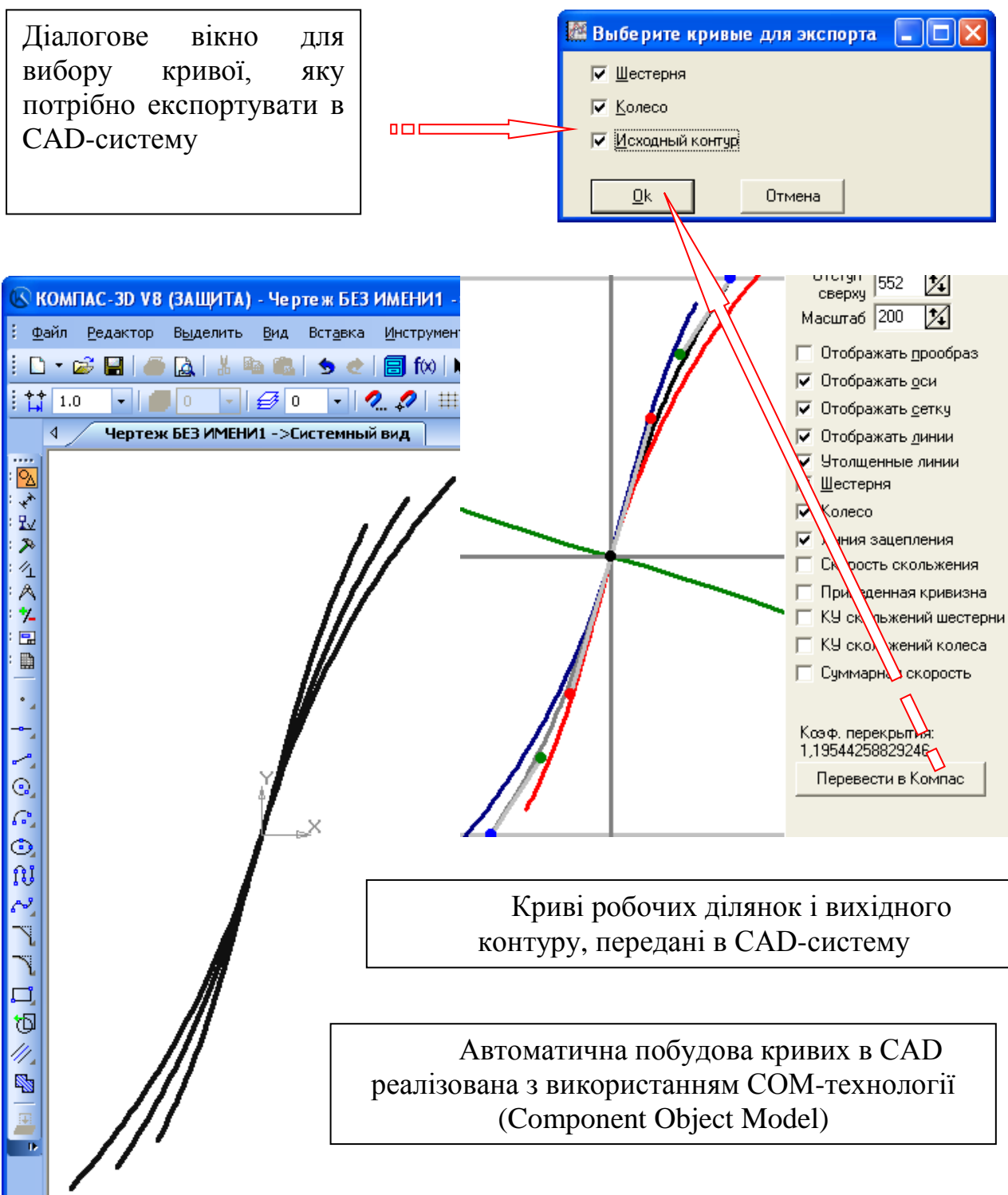


Рис. 5.34. Интерфейс передачи геометрии с системы формообразования у CAD-систему

параметричних моделей створюваних виробів (рис. 5.34) або подальшої розробки електронного еталона комп'ютерної моделі зубообробного інструменту (рис. 5.28) або зубчастого колеса (рис. 5.35).

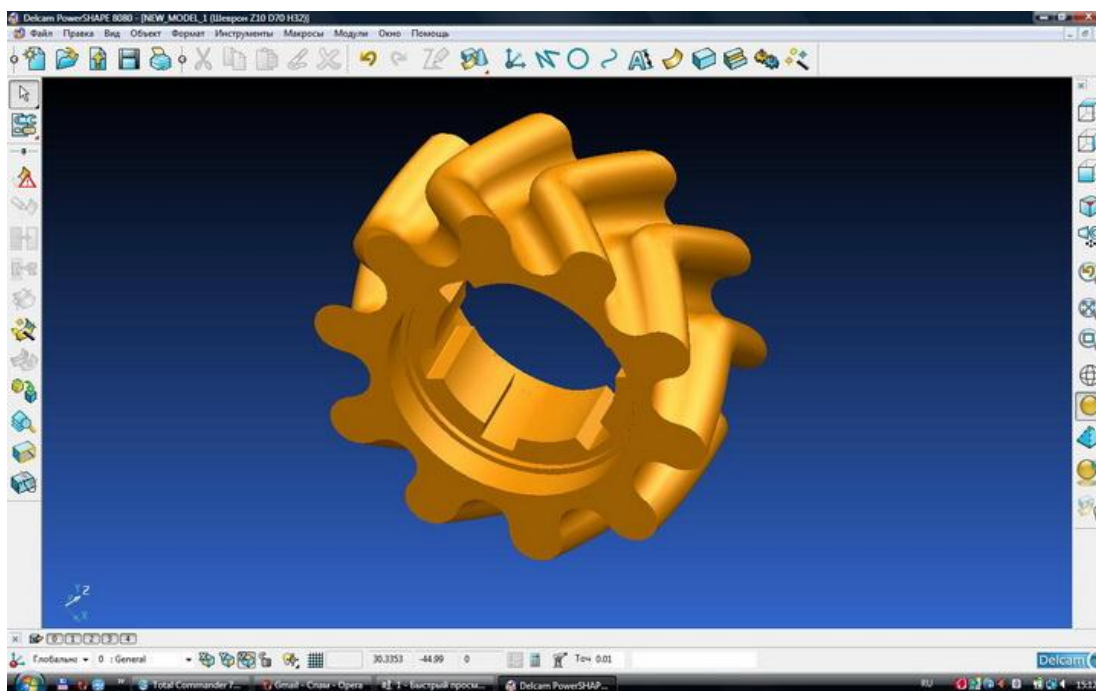


Рис. 5.35. Візуалізація комп'ютерної моделі шевронного колеса в Autodesk PowerSHAPE

5.3.2. Електронні еталони при механічному обробленні зубчастих коліс традиційними методами

В якості традиційних засобів вимірювання і контролю зачеплень і їх елементів широко використовуються як універсальні вимірювальні прилади – мікрометри, штангенциркулі, прилади індикаторного типу та інші інструменти, широко поширені в вимірювальній практиці машинобудування, так і спеціальні, такі як прилади для контролю радіального биття зубчастих вінців, нормалеміри, межцентроміри, крокоміри, штангензубоміри, евольвентоміри і та ін. Аналіз традиційних засобів вимірювання і контролю параметрів зубчастих коліс наведено в роботах [181], [246], [247]. Суттєвим недоліком цих засобів вимірювання є низький рівень автоматизації та вузька спеціалізація цих приладів, при якій для кожного контрольованого параметра потрібно застосовувати свій засіб вимірювання. Тому, широкого поширення набувають координатно-вимірювальні машини (КВМ) різних типів, які використовують електронні еталони при контролі точності готових зубчастих

коліс (п. 1.4.3).

Для розробки електронних еталонів комп'ютерних моделей зубчастих коліс і зуборізних інструментів використовуються промислові САІ-системи, наприклад, PowerInspect фірми Autodesk, які інтегруються в координатно-вимірювальні комплекси.

Серед спеціалізованих лазерних КВМ, призначених для вимірювання і контролю зубчастих коліс слід зазначити вимірювальну систему HN-C3030 виробництва фірми Nikon Metrology NV (Бельгія) корпорації Nikon Corporation (Японія), яка дозволяє обробляти до 120 000 точок в секунду. Так, наприклад, перевірка всієї поверхні зубців на одній автомобільній конічній зубчастій передачі може бути проведена лише за 5 хвилин (рис. 5.36). Висока щільність ліній у хмарі точок з кроком 20 мкм дозволяє аналізувати не тільки геометрію, але і хвилястість поверхні зубців.

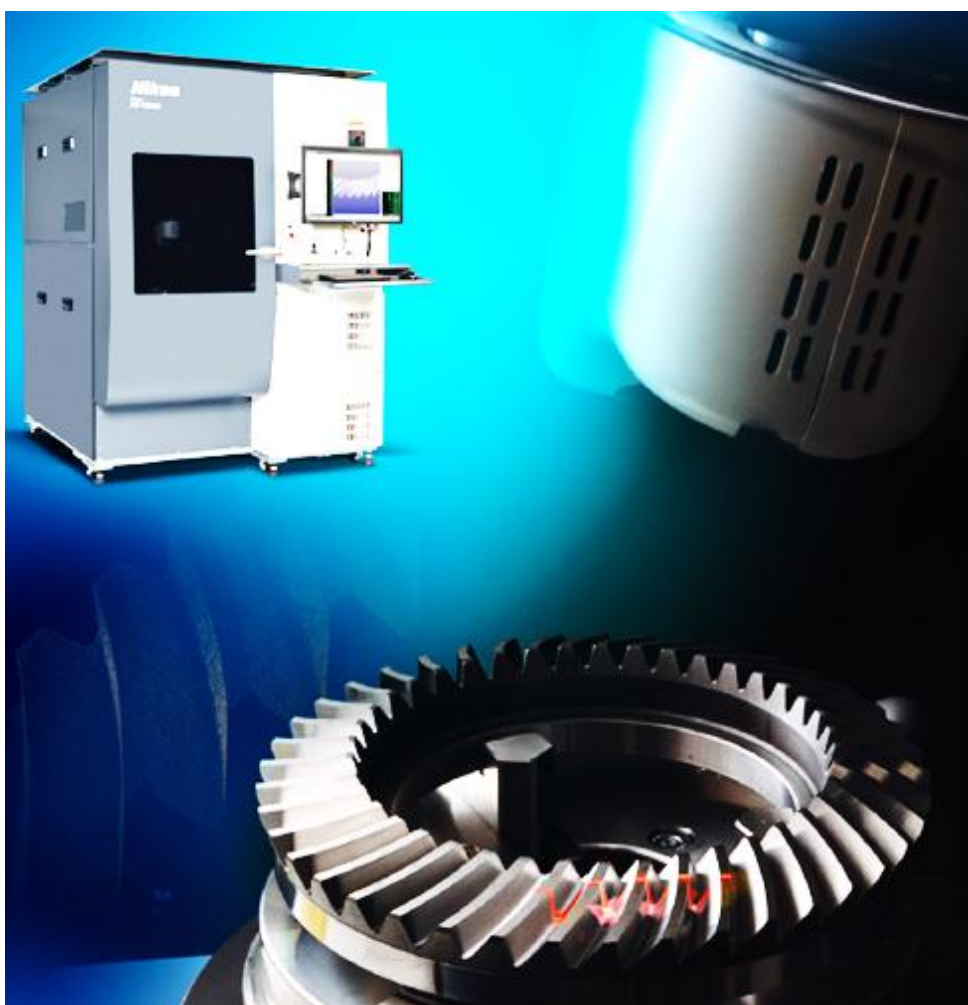


Рис.5.36. Контроль геометрії зубчастого колеса безконтактним методом [280]

Точність зубчастих коліс, отримана в процесі механічної обробки, в першу чергу, залежить від точності геометрії різальної кромки інструменту. Для точного контролю геометрії зуборізних інструментів і порівняння результатів з еталонними комп'ютерними моделями широко використовуються координатні зубовимірювальні комплекси MarGear GMX фірми Mahr GmbH (рис. 5.37) та ін.



Рис. 5.37. Контроль геометрії черв'ячної фрези контактним методом [284]

Так, при виготовленні і переточуванні черв'ячних фрез контролюються:

- осьове і радіальне биття буртів;
- крок і напрямок стружкових канавок;
- профіль на різальній кромці або нижче різальної кромки;
- оцінка результатів вимірювання гвинтової лінії і кроку зубців;
- оцінка похибки профілю і розташування передньої поверхні;
- оцінка товщини зуба;
- аналіз відповідності DIN 3968 та іншим стандартам.

Отримані в результаті вимірів точки, відповідно до значень своїх координат, поміщаються на електронний еталон комп'ютерної моделі, і за відхиленнями від еталону приймається подальше рішення щодо доопрацювання та використання отриманих виробів.

За допомогою розробленого в роботі математичного, методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення були спроектовані і виготовлені

шевронні, гвинтові та гіперболоїдні зубчасті колеса, а також, спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для механічного оброблення циліндричних зубчастих коліс. Контроль геометрії готових виробів здійснювався за допомогою координатно-вимірювальних машин, а результати порівнювалися з електронними еталонами зубчастих коліс та інструментів.

5.3.3. Інтеграція з САМ-системами

В даний час у Україні експлуатується велика кількість імпортного обладнання, деталі якого вимагають заміни або модернізації [83]. Для підвищення терміну служби та ефективності його використання виникають завдання виготовлення різних відповідальних вузлів і деталей та поліпшення їх експлуатаційних властивостей. Виготовлення таких деталей традиційними методами в умовах одиничного виробництва економічно недоцільно. Виходом з цієї ситуації є синтез сучасних комп'ютерних технологій і обладнання з ЧПК.

Одним з видів деталей, які широко використовуються в різних вузлах імпортного обладнання, є зубчасті колеса, що мають складні і складнопрофільні поверхні. При цьому за зношеними або зруйнованими зубцями коліс необхідно відновити первинну геометрію, провести аналіз та синтезувати форму зубців. В основі проектування і виробництва лежить розробка і аналіз твердотільних комп'ютерних моделей.

На основі отриманих комп'ютерних моделей готовий виріб можна отримати двома способами. До першого способу можна віднести адитивні технології виготовлення деталей, що мають складні поверхні. Ці технології базуються не на відділенні об'ємів, що становлять припуск, а на пошаровому нарощуванні об'єктів до досягнення необхідних характеристик.

До другого способу можна віднести технології, при яких за комп'ютерними моделями генеруються керуючі програми для верстатів з ЧПК, а подальше виготовлення ведеться традиційними способами [291].

Для одночасного фрезерування відразу 4-х зубчастих коліс була спроектована і виготовлена спеціальна оправка (рис. 5.38).

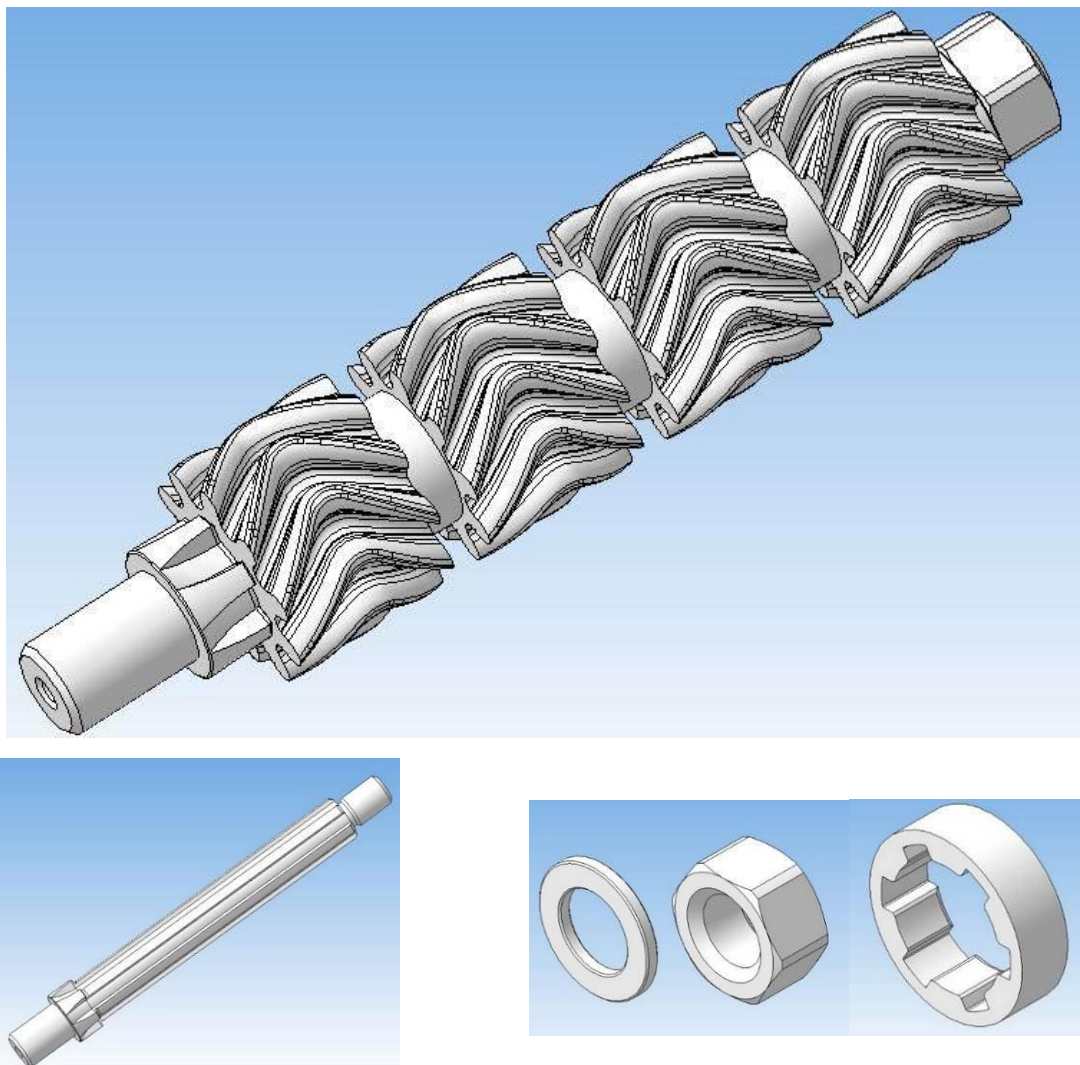


Рис. 5.38. Комп'ютерна модель оправки для виготовлення зубчастих коліс та її деталей

Для виготовлення набору зубчастих коліс використовувалася система Autodesk PowerMill – одна з найдосконаліших САМ-систем, призначена для програмування складних видів фрезерної обробки на багатокоординатних верстатах з ЧПК. Вона містить в собі високоефективні стратегії оброблення, що дозволяють значно скоротити час обробки на верстаті та забезпечити якість оброблених поверхонь.

Autodesk PowerMill комбінує технології багатопотокової обробки даних з обчисленнями в фоновому режимі, що забезпечує використання всіх

можливостей сучасних персональних комп'ютерів з багатоядерними процесорами. Обчислення в фоновому режимі дозволяють організувати роботу так, що користувачеві не потрібно чекати, поки Autodesk PowerMill вирахує траєкторії. Багатопотокова обробка даних скорочує час, що витрачається на розробку керуючих програм.

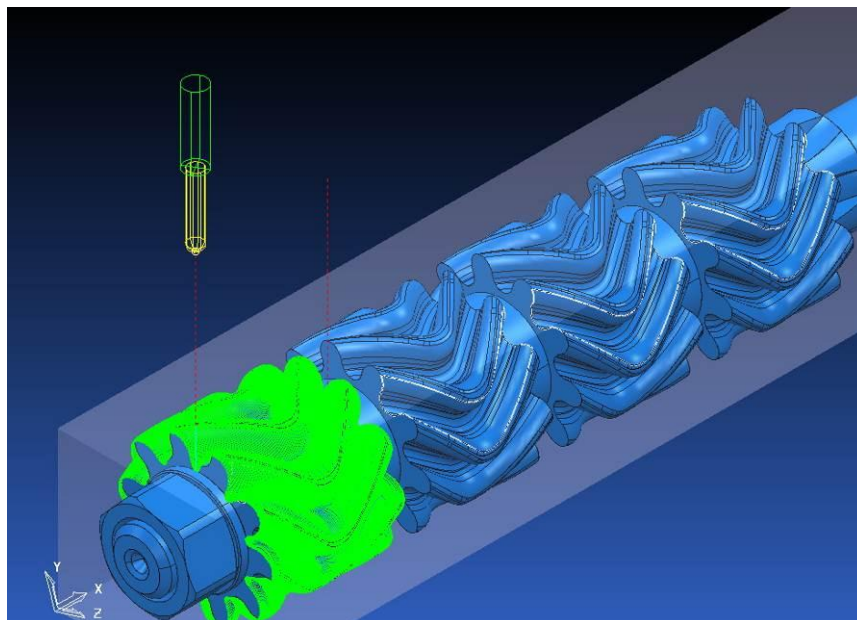


Рис. 5.39. Комп'ютерна імітація фрезерування шевронних зубчастих коліс в Autodesk PowerMill [291]

Параметричне зміщення створює траєкторії для оброблення поверхні зі змінним, а не з постійним кроком. Ця стратегія дозволяє обробити область цілком без різких змін напрямку.

Застосування в Autodesk PowerMill повної 3D-моделі залишку матеріалу забезпечує стабільні режими різання і скорочує непотрібні переміщення. На будь-якому етапі оброблення можна розрахувати і візуалізувати решту матеріалу, що дозволяє полегшити вибір відповідних стратегій та інструменту для усунення залишків матеріалу (рис. 5.41).

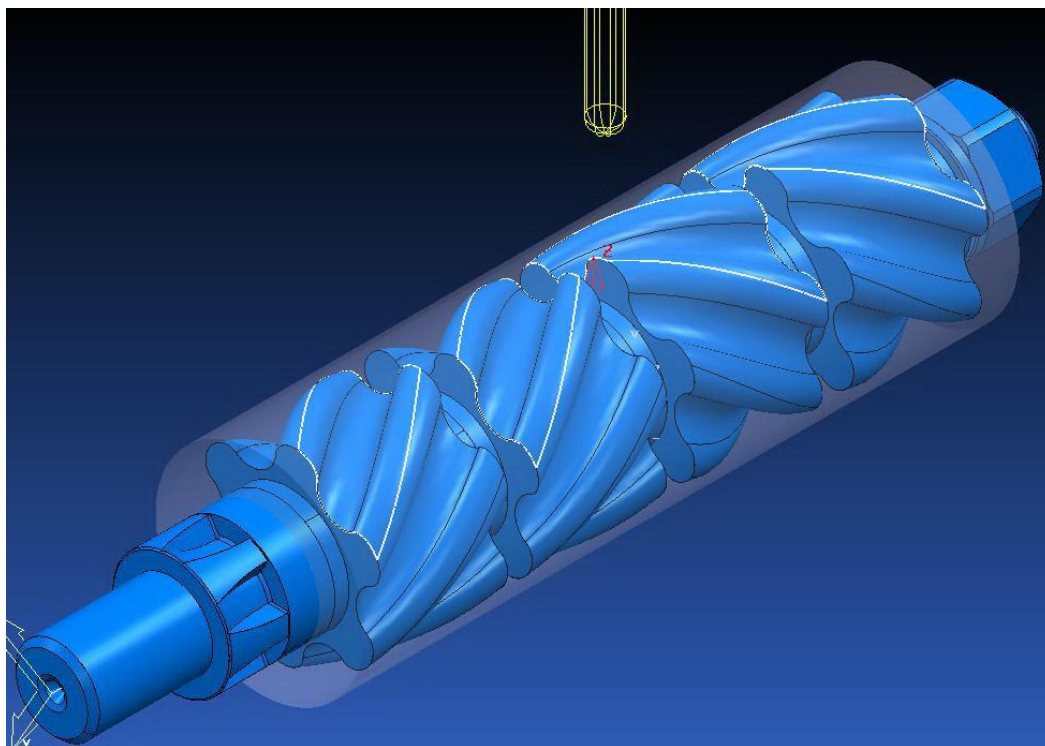


Рис. 5.40. Комп'ютерна імітація фрезерування косозубих коліс в Autodesk PowerMill [291]

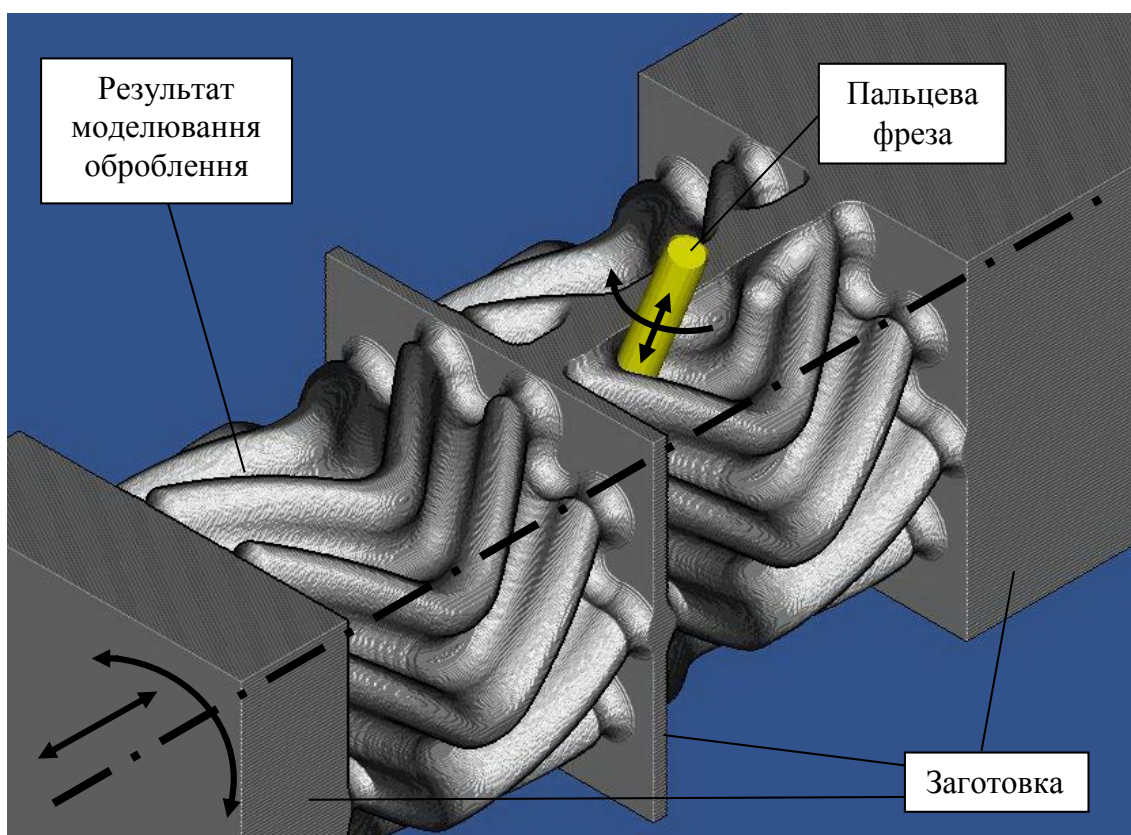


Рис. 5.41. Візуалізація процесу фрезерування шевронних зубчастих коліс на верстаті з ЧПК [291]

Змодельовані зубчасті колеса були виготовлені на модернізованому копіювально-фрезерному двошпиндельному верстаті Starrag KF-200 з ЧПК HEIDENHAIN 355 з програмно керованою ділильною головкою (рис. 5.42). Обертання заготовки здійснювалося за допомогою оснащеної кроковим двигуном ділильної головки по керуючій програмі.

Як матеріал заготовки використовувався поліетилентерефталат твердістю HB 170. Рекомендовані режими різання при фрезеруванні: подача до $0,05 \text{ мм/зуб}$, швидкість різання $150\text{-}300 \text{ м/хв.}$ задній кут $\alpha = 5^\circ \dots 15^\circ$, передній кут $\gamma = 0^\circ \dots 15^\circ$.

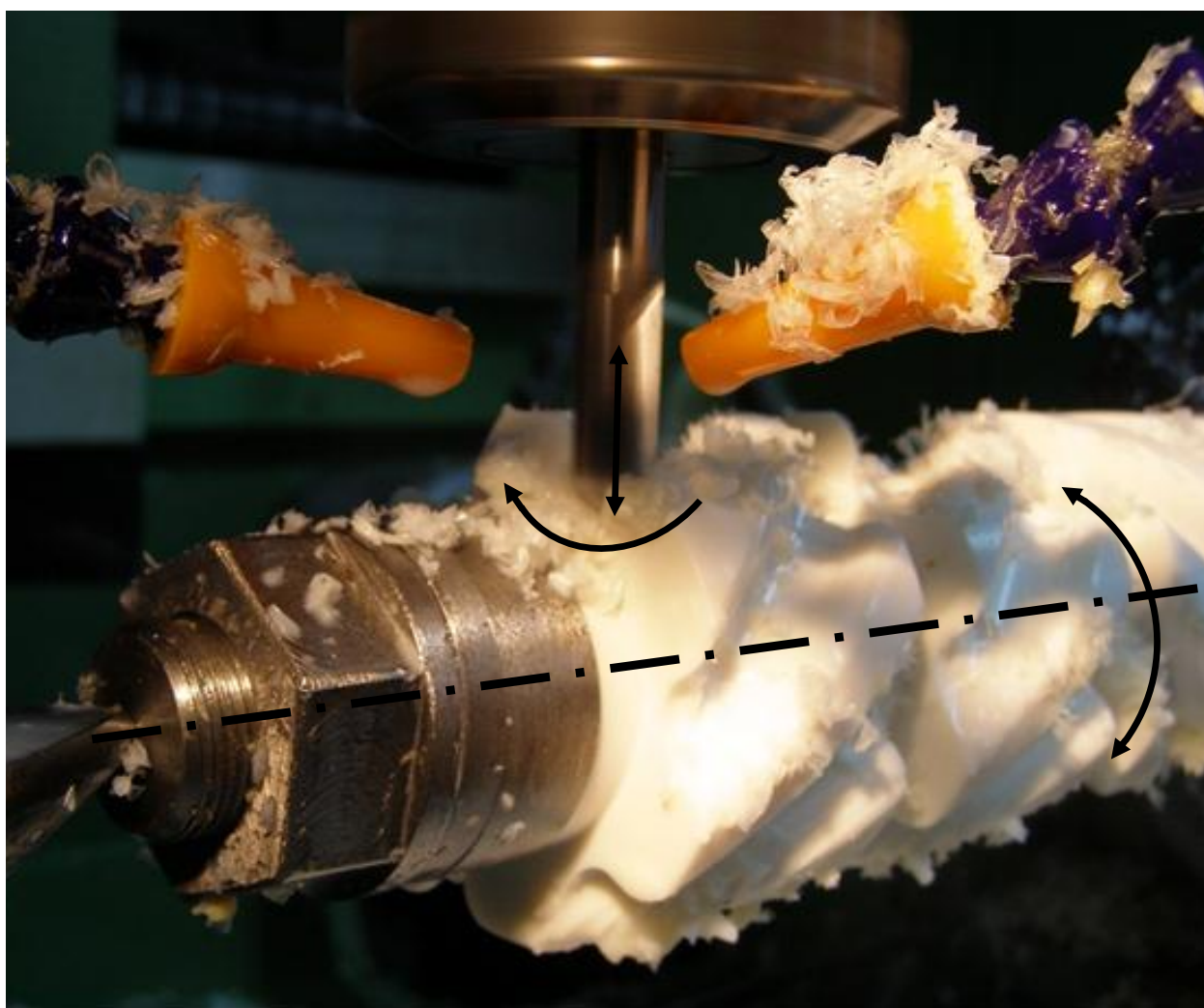


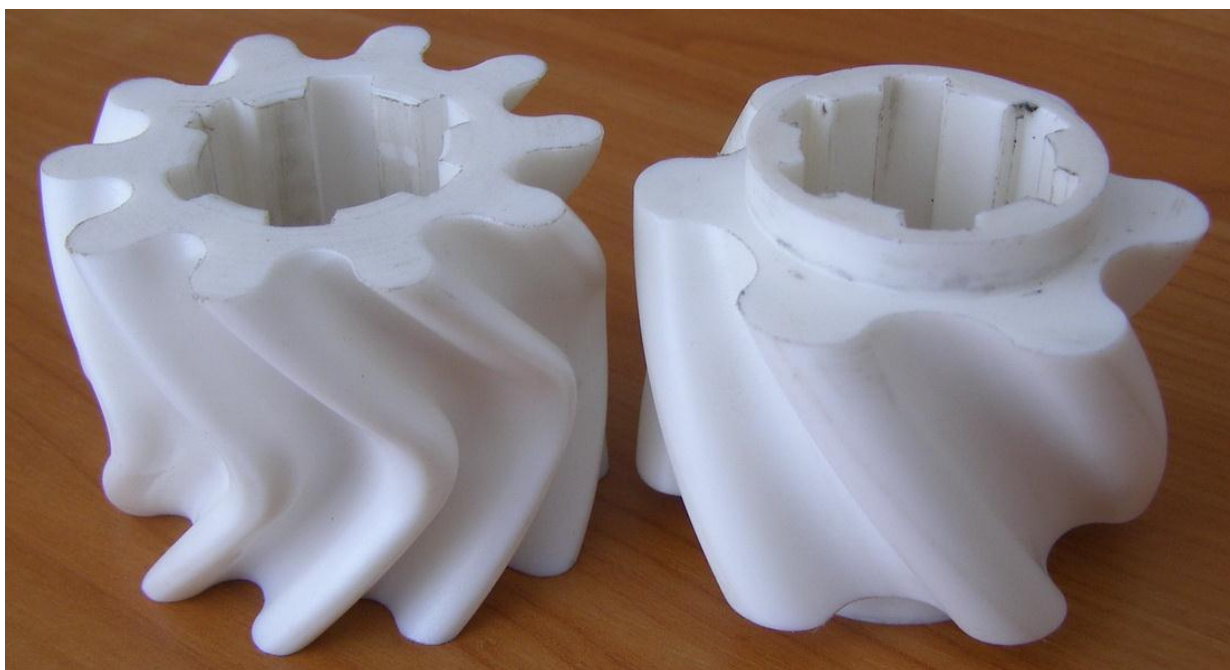
Рис. 5.42. Чорнове оброблення косозубих зубчастих коліс на верстаті з ЧПК моделі Starrag KF-200

При використанні сучасних комп'ютерних технологій і комплексу програм сімейства Autodesk PowerSolution спрощується спосіб отримання,

аналізу та вдосконалення електронних еталонів твердотільних комп'ютерних моделей деталей зі складною геометрією.

Використання програмних комплексів і верстатів з ЧПК дає можливість виготовляти зубчасті колеса з різними поверхнями зубців (рис. 5.43) без використання спеціального інструменту і зубофрезерних верстатів.

Запропонований спосіб дозволяє скоротити терміни і знизити собівартість одиничного виробництва зубчастих коліс, що мають складні і складнопрофільні поверхні.



а)

б)

Рис. 5.43. Результат оброблення на верстаті з ЧПК шевронного (а) та косозубого (б) зубчастих коліс

5.3.4. Адитивні технології

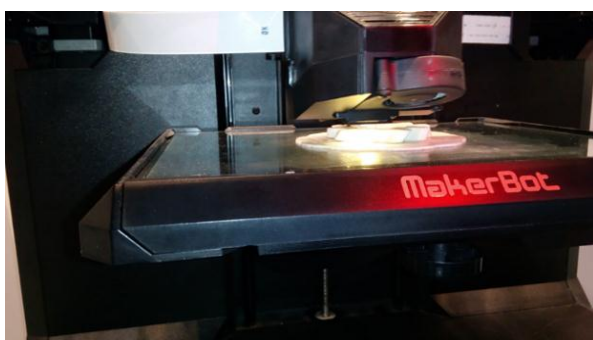
Комп'ютерні моделі зубчастих коліс зі складними поверхнями, отримані в результаті використання розробленої системи формоутворення слугують основою для використання адитивних технологій їх виготовлення [285].

Технологія моделювання методом пошарового наплавлення (Fused

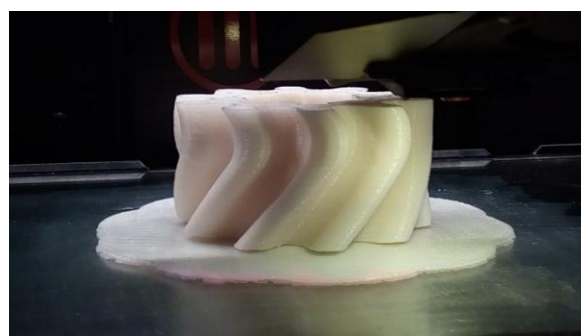
Deposition Modeling – FDM) в поєднанні з термопластиком виробничого класу дозволяє створювати міцні і стабільні за розмірами компоненти, які характеризуються більш високою точністю і повторюваністю.

3D-принтери на основі технології FDM створюють деталі шар за шаром від низу до верху, нагріваючи і видавлюючи термопластичну нитку. Програмне забезпечення для підготовки до друку ділить на секції і розміщує файл 3D–CAD, а також прораховує шлях видачі термопластику і необхідного допоміжного матеріалу.

Адитивне створення шевронного зубчастого колеса здійснювалось на принтері Makerbot Replicator 5 (рис. 5.44). На рис. 5.44,а видно, що на початку роботи роздруковується підкладка під майбутню деталь, яка служить проміжною ланкою між робочим столом і деталлю. На рис. 5.44,б показаний процес створення шевронного зубчастого колеса на етапі 75 % готовності..



а)



б)

Рис. 5.44. Ілюстрація адитивного створення шевронного зубчастого колеса:
а – на початковій стадії; б – на етапі 75 % готовності

5.3.5. Інтеграція з САІ–системами

Інтеграцію розробленої системи формоутворення з САІ–системами розглянемо на прикладі реінжинірингу зношених зубчастих коліс на базі сучасних апаратно–програмних комплексів та оригінального програмного забезпечення [81], [285].

«Реінжиніринг (зворотний інжиніринг) – технологія відтворення за наявним фізичним оригіналом, яка інтенсивно розвивається, має широкі

практичні перспективи, вимагає наукового підходу до його вивчення для вирішення цілої низки проблем: раціонального обґрунтованого вибору методу зворотного інжинірингу, обладнання та програмного забезпечення з урахуванням особливостей промислових виробів» [125].

Залежно від завдання реінжинірингу і вихідного стану зубчастих коліс до вимірювального устаткування висуваються різні вимоги. Якщо необхідно отримати інформацію за вимірюваннями нового зубчастого колеса і потім його відтворити з максимальною точністю, необхідні координатно-вимірювальні машини високої точності. Якщо ми отримуємо геометричну інформацію із зношеної деталі, то точність вимірювання може бути на порядок менше, але не перевищувати величину зношування поверхні зубців [15].

Для отримання первинної інформації використовувалася КВМ FARO Edge ScanArm HD (рис. 5.45).

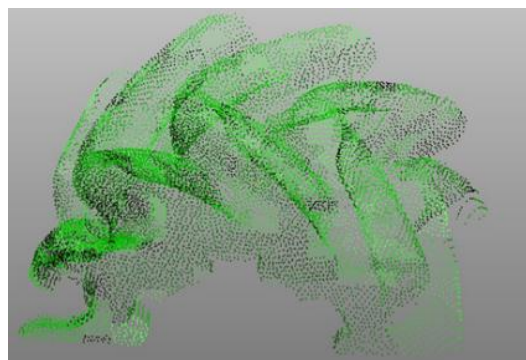


Рис. 5.45. КВМ FARO Edge ScanArm HD [187]

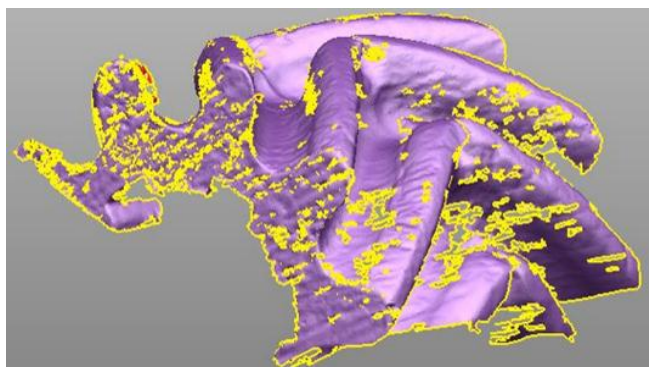
Процес отримання початкової інформації в загальному вигляді передбачає етапи, представлені на рис. 5.46.



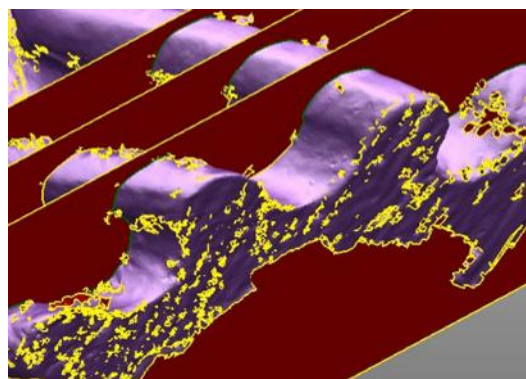
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.46. Процес отримання вихідної інформації:

а – сканування оригіналу; б – «хмара» точок вимірної моделі; в – поверхнева модель з дефектами; г – визначення перерізів з паралельними площинами

Після підготовки поверхні зубчастого колеса виконується процес його оптичного сканування (рис. 5.46,а). Безконтактний лазерний сканер за один прохід сканує зону певної фіксованої ширини. Щоб оцифрувати всю деталь, робиться кілька скануючих проходів з різних ракурсів, щоб промінь лазера міг дістатися до затінених зон.

На наступному етапі (рис. 5.46,б) отримується хмара точок. Необхідно відзначити, що будь-яка координатно-вимірювальна машина або 3D-сканер в результаті сканування видає дискретний набір 3D-точок. Оскільки для роботи з тріангульованими даними застосовуються особливі методи математичного опису, що відрізняються від використовуваних для поверхневих або твердотільних CAD-моделей, з'явився особливий клас САПР, орієнтований на обробку та редагування саме сканованих хмар точок.

Далі (рис. 5.46,в) формується огортаюча поверхня, яка в разі зношених зубчастих коліс повинна бути піддана процедурі відновлення («клікування»).

На наступному етапі (рис. 5.46,г) для визначення профілю зубців шевронного колеса, розбиваємо побудовану триангуляційну модель перерізами, паралельними до торця моделі з кроком 5 мм. Для цього на торці вибираємо три точки і через них проводимо торцеву площину. У кожній з січних площин будуємо лінії перетину площин і моделі. Видаляючи триангуляційну модель, отримуємо профілі зубців колеса в січних площинах. Після видалення січних площин отримуємо криві, що описують профілі зубців в різних перерізах. Видаляємо випадково відхилені криві, з'єднуємо розриви і згладжуємо криві в точках контакту. Для того, щоб отримати більш достовірну інформацію про профілі декількох зубців, ми повертаємо всі перерізи навколо осі колеса і зводимо їх до проекції на один зуб (рис. 5.47).

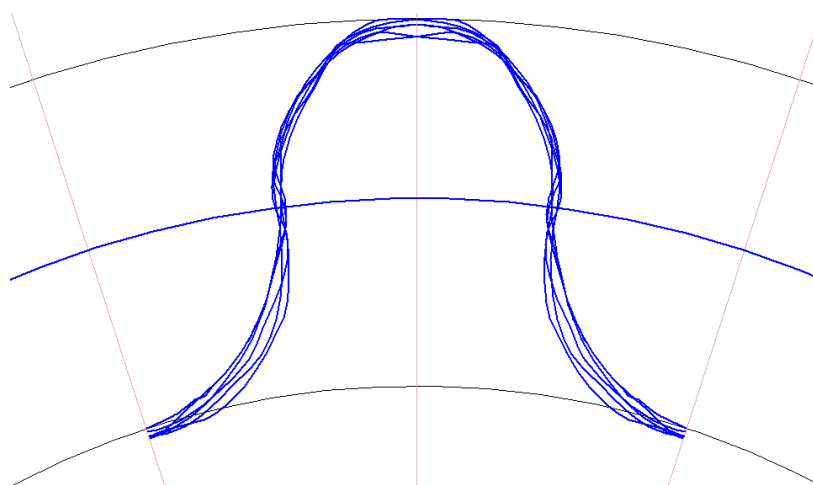


Рис. 5.47. Поєднання профілів в один зуб

Для формування профіля зуба підставляємо значення координат отриманих точок вихідного контуру в програму апроксимації точок кривими Безьє 3-го порядку і отримуємо значення координат керуючих точок кривих. Для кривої, яка описує головку зуба маємо наступні значення:

$$x_0 = 0, \quad y_0 = 0; \quad x_1 = 0,028, \quad y_1 = 0,735;$$

$$x_2 = 0,455, \quad y_2 = 0,919; \quad x_3 = 0,637, \quad y_3 = 1.$$

Аналогічно отримуємо значення координат керуючих точок кривої

Безьє, яка описує профіль ніжки зуба:

$$\begin{aligned}x_0 &= 0, & y_0 &= 0; & x_1 &= -0,022, & y_1 &= -0,372; \\x_2 &= -0,162, & y_2 &= -0,670; & x_3 &= -0,735, & y_3 &= -1.\end{aligned}$$

Знайдемо вихідний контур твірної поверхні для спряженого зубчастого колеса, використовуючи той самий алгоритм. У нашому випадку в зачепленні з передавальним відношенням $u=1$ беруть участь однакові зубчасті колеса. Тому крива, що описує вихідний контур, при повороті на 180° навколо полюса зачеплення повинна взаємно накладатися. Крім того, для колеса і для шестерні повинен бути один вихідний контур. В іншому випадку не буде виконуватися основний закон зачеплення, миттєве передавальне відношення буде коливатися, що викличе динамічні навантаження в точках контакту. Також не буде забезпечений лінійний контакт в зачепленні, що знизить контактну міцність зубців. Як видно з рис. 5.49, вихідні контури не збігаються, але відома область, що обмежує вихідний контур, який максимально відповідає заданому зачепленню.

Тому необхідно проаналізувати граничні зовнішні і внутрішні вихідні контури за показниками, що відображають функціональні можливості зубчастого зачеплення і вибрати такий, що найкраще підходить.

Повертаємо профіль до співпадання полюса з початком системи координат. За зовнішньому контуром будуюмо точки і знімаємо значення їх координат. Заносимо отримані значення в програму апроксимації точок кривими Безьє і отримуємо значення координат керуючих точок кривих. Для кривої, яка описує головку зуба маємо наступні значення:

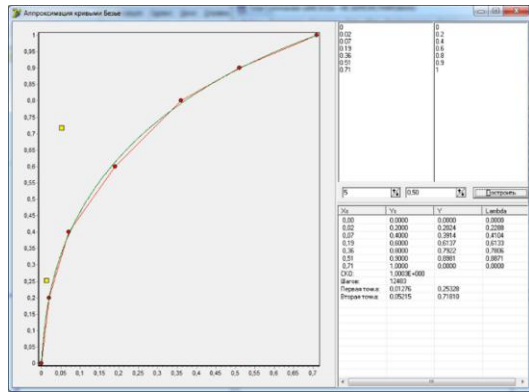
$$\begin{aligned}x_0 &= 0, & y_0 &= 0; & x_1 &= 0,01, & y_1 &= 0,25; \\x_2 &= 0,05, & y_2 &= 0,72; & x_3 &= 0,71, & y_3 &= 1.\end{aligned}$$

Аналогічним чином отримуємо значення координат керуючих точок кривої Безьє, яка описує профіль ніжки зуба:

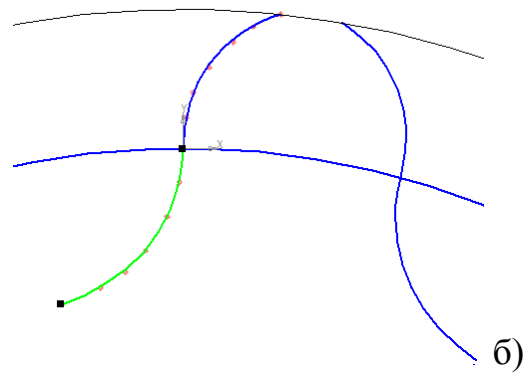
$$\begin{aligned}x_0 &= 0, & y_0 &= 0; & x_1 &= -0,01, & y_1 &= 0,08; \\x_2 &= -0,01, & y_2 &= -0,81; & x_3 &= -0,87, & y_3 &= -1,12.\end{aligned}$$

На рис. 5.48 показані результати розрахунку і відтворення профілю

зуба.



а)



б)

Рис. 5.48. Результаты розрахунку(а) і профіль зуба (б)

Наступним етапом є синтез електронного еталона зубчастого зачеплення. За допомогою програмного забезпечення «SAIAT» [236] були проаналізовані отримані результати і внесені корективи в геометрію комп'ютерних моделей зубчастих коліс.

На рис. 5.49 наведені результати порівняльного аналізу граничних симетричних вихідних контурів, отриманих вище.

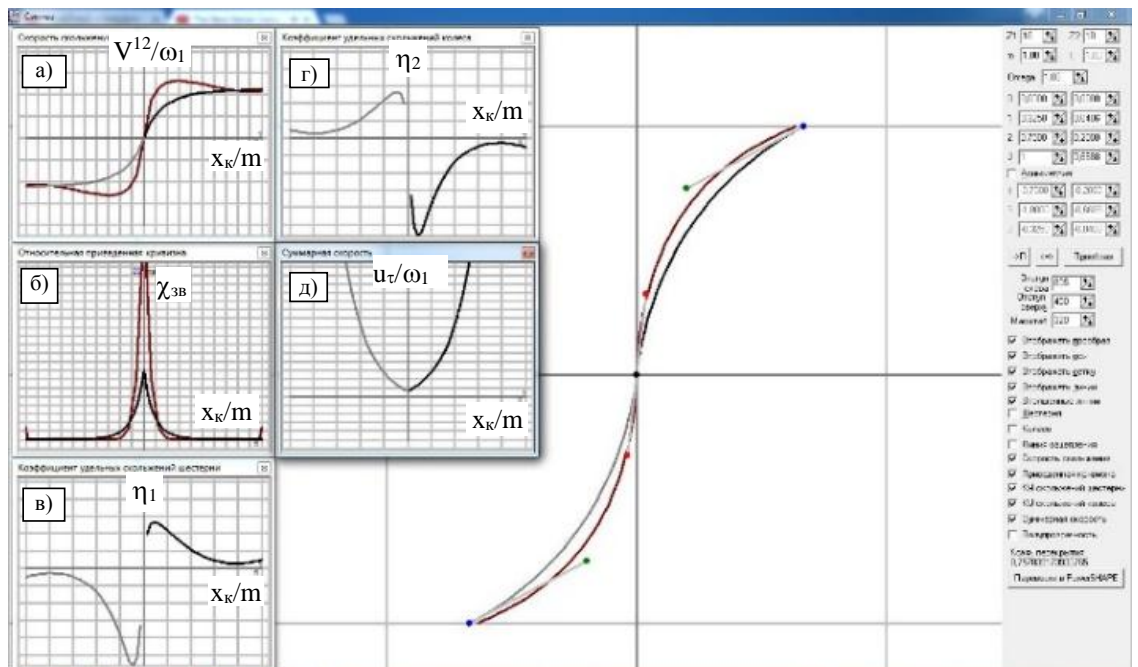


Рис. 5.49. Порівняльний аналіз вихідних контурів:

- а – відносна швидкість ковзання робочих поверхонь; б – зведена кривизна поверхонь зубців; в, г – коефіцієнти питомих ковзань шестерні і колеса;
- д – сумарна швидкість переміщення точок контакту

Інтерактивно керуючи вихідним контуром, вдалося значно поліпшити геометричні та кінематичні показники синтезованого зачеплення.

Як видно з рис. 5.49, в результаті синтезу вдалося знизити відносну швидкість ковзання зубців в 1,5-2 рази, що сприятливо вплине на зносостійкість зачеплення і більш ніж в 2 рази знизити приведену кривизну зубців в навколополіусній зоні, що підвищить контактну міцність зубців в точках контакту.

Далі, для створення еталонної моделі зубчастого колеса, криві автоматично переносяться в систему твердотілого моделювання.

На підставі синтезованого контуру зубців в системі Autodesk PowerSHAPE створена твердотільна комп'ютерна модель (рис. 5.35). За моделлю на верстаті з ЧПК (рис. 5.42) і на 3D-принтері (рис. 5.44) були виготовлені зубчасті колеса (рис. 5.50).

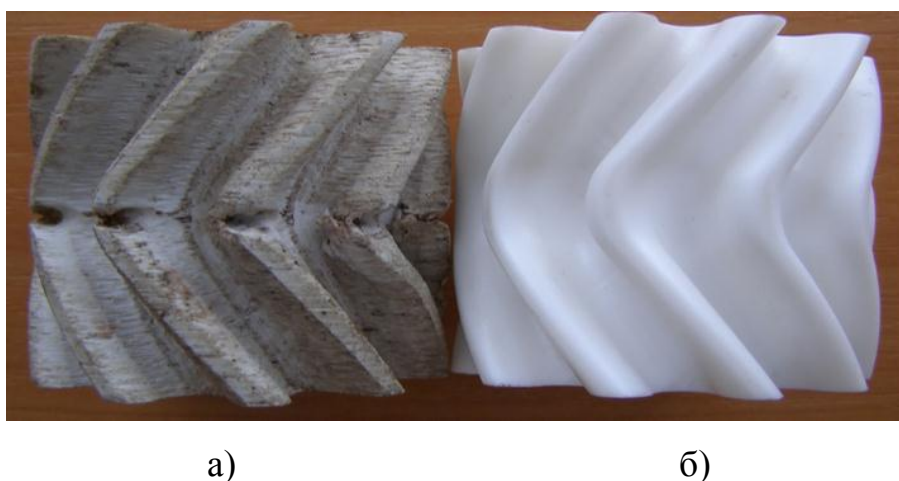


Рис. 5.50. Зношене (а) і виготовлене (б) зубчасті колеса

Далі на рис. 5.51 показаний процес проведення остаточного контролю геометрії отриманого шевронного колеса за допомогою KBM FARO Edge ScanArm HD.

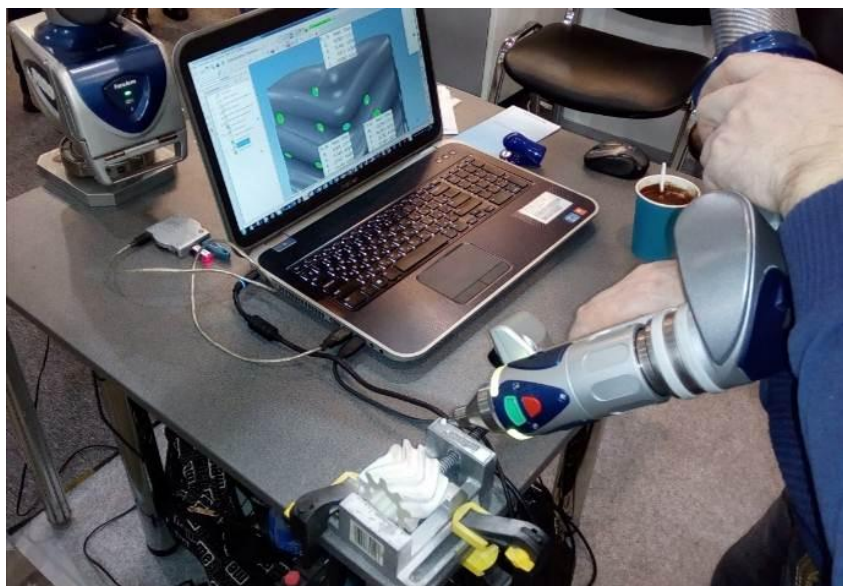


Рис. 5.51. Контроль геометрії зубчастого колеса за допомогою КВМ FARO Edge ScanArm HD

Відсканована хмара точок поверхонь зубців автоматично накладається на поверхню еталонної моделі зубчастого колеса. Причому базування здійснюється за хмарами точок в комп'ютерній програмі Autodesk PowerINSPECT. Результати контрольної операції оформляються у вигляді протоколу, в якому відображаються координати точок і величини відхилень від номінального розміру із зазначенням точок на поверхні колеса в графічному звіті (рис. 5.52).

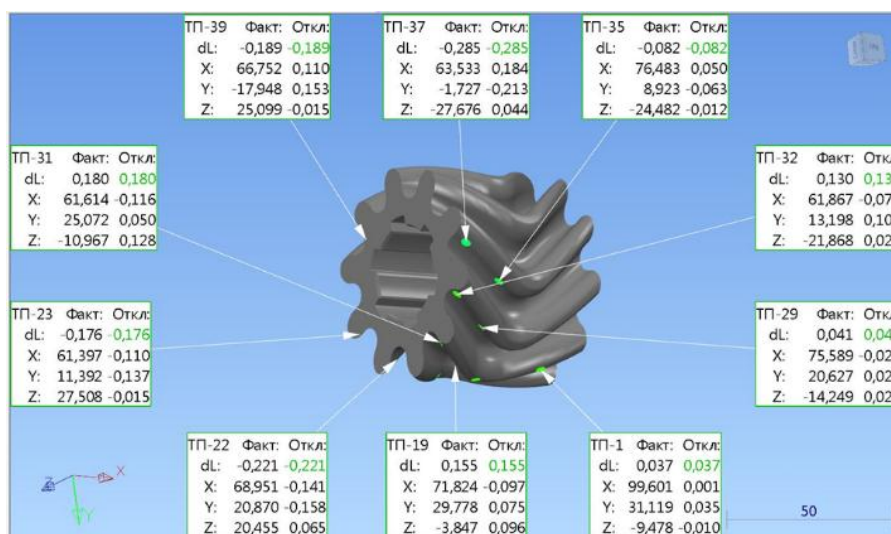


Рис. 5.52. Візуалізація протоколу вимірювань в комп'ютерній програмі Autodesk PowerINSPECT

В результаті досліджень реалізований оригінальний підхід до технології реінжинірингу зубчастих зачеплень для умов зношених зубчастих коліс з використанням сучасних апаратно-програмних комплексів, створення електронного еталона зубчастого зачеплення і оригінального програмного забезпечення в основі якого лежить модель уніфікованого опису зубчастих зачеплень, інваріантна до вихідного профілю зубчастого зачеплення.

Висновки до розділу 5

1. Методики, алгоритми і програмне забезпечення для інтерактивного керування формоутворенням поверхонь, уніфікації керуючих параметрів, визначення контактних точок, оптимізаційного синтезу функціональних поверхонь зубчастих коліс та інструментів, засновані на отриманих в роботі математичних моделях, дозволили розробити комп'ютерно-інтегровані системи формоутворення зубчастих коліс з можливістю автоматизованого проектування та інтерактивного керування.

2. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс дозволяє передавати отримані комп'ютерні моделі функціональних поверхонь коліс та інструментів в промислові системи автоматизованого проектування, виробництва і контролю геометричних параметрів виробів, що виготовляються.

3. Прямий інтерфейс з системою автоматизованого проектування дозволяє автоматично передавати геометричну інформацію в промислові CAD-системи, а при наявності параметричних бібліотек готових виробів, автоматично редагувати комп'ютерні моделі.

4. При наявності еталонних комп'ютерних моделей генеруються і аналізуються керуючі програми для верстатів з ЧПК. Це дозволяє виготовляти вироби, які мають складні поверхні, без застосування спеціального інструменту та додаткового оснащення.

5. За допомогою адитивних технологій були виготовлені зубчасті

колеса, функціональні поверхні яких відповідають вимогам, що пред'являються до точності зубчастих коліс.

6. Використання САІ-системи дозволило вирішити задачу реінжинірингу зношеного шевронного колеса із забезпеченням необхідної якості.

7. Нове програмне забезпечення для аналізу і синтезу функціональних поверхонь, використане для проектування деталей спеціального призначення, дозволило скоротити витрати часу на технологічне проектування на 25-30%, підвищити якість технологічного проектування та ефективність роботи технологів, підвищити продуктивність роботи при механічній обробці деталей зі складною функціональною поверхнею в середньому на 12%.

На розроблене програмне забезпечення отримані свідоцтва про авторське право на твір [233], [234], [235], [236], [237] (додаток В).

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [4], [27], [50], [62], [64], [65], [66], [67], [77], [78], [80], [81], [82], [83], [86], [89], [93], [126], [128], [199], [200], [211] [285], [291].

РОЗДІЛ 6

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

6.1. Виготовлення зубчастих коліс і зубообробного інструменту

6.1.1. Виготовлення гіперболоїдних коліс

Нарізати зубці на однопорожнинному гіперболоїді за допомогою циліндричного зубчастого колеса в виробничих умовах дуже складно [58]. Для цього необхідно модернізувати верстат таким чином, щоб нарізуване гіперболоїдне зубчасте колесо та інструментальне колесо мали узгоджені обертання за рахунок гітари розподілу верстата, крім того інструментальне зубчасте колесо має рухатися в горизонтальній площині. Для цього необхідно значно модернізувати зубофрезерний верстат або спроектувати зубообробний верстат нової конструкції, що в даний час є досить складно.

Будемо нарізати зубці на гіперболоїді за допомогою стандартних зубофрезерних верстатів «Pfauter» і 5E32, які в своїй конструкції мають протяжний супорт. Для такого нарізування зубців на однопорожнинному гіперболоїді необхідно заготовку обробити на токарному верстаті, таким чином, щоб її зовнішня поверхня мала форму гіперболоїда. Ця заготовка встановлюється на інструментальній оправці, закріпленій в інструментальному шпинделі зубофрезерного верстата. Шпиндель верстата повертають на кут, рівний куту підйома витка однопорожнинного гіперболоїда. На столі верстата встановлюється інструментальне зубчасте колесо, таким чином, щоб його передня поверхня була паралельна прямолінійній твірній однопорожнинного гіперболоїда. За допомогою гітари розподілу верстата гіперболоїдне зубчасте колесо, яке нарізується, та інструментальне колесо приводяться в узгоджене обертання. Інструментальний супорт має одночасно дві подачі: осьову і тангенціальну. В результаті цих двох подач гіперболоїдне зубчасте колесо переміщується з положення I в положення II, а потім і в положення III, в якому колеса виходять із зачеплення, і повністю

припиняється процес нарізування [202]. Схема такого нарізування представлена на рис. 6.1.

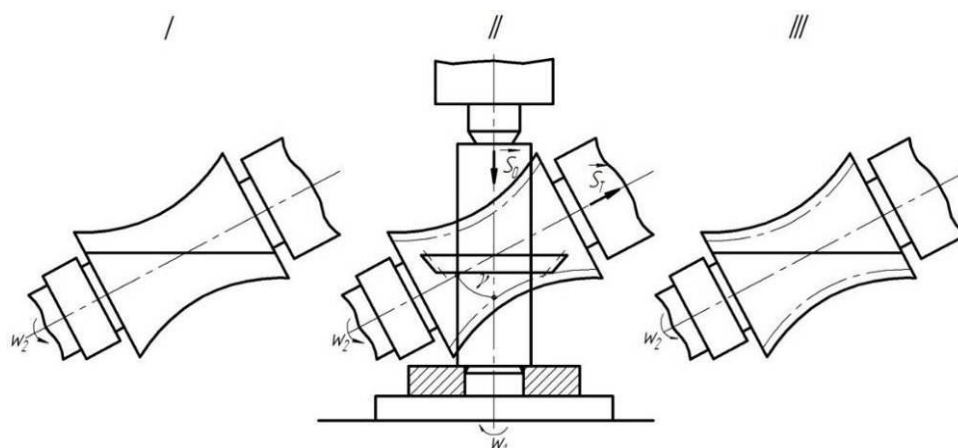


Рис. 6.1. Схема нарізування зубців на гіперболоїдній заготівлі

Необхідно відзначити, що при нарізуванні гіперболоїдних зубчастих коліс згідно зі схемою, представленою на рис. 6.1, зовнішня поверхня заготовки має не гіперболоїдний профіль, а профіль тіла виду «однопорожнинний гіперболоїд». Інструментальне зубчасте колесо формоутворює як зубці гіперболоїдного колеса так і зовнішню гіперболоїдну поверхню. В цьому випадку різання металу відбувається закритим різальним контуром, отже, умови різання несприятливі, що значно впливає на якість і точність обробки. З метою усунення цих недоліків в роботі був розроблений і запатентований новий спосіб нарізування зубців, представлений на рис. 6.2.

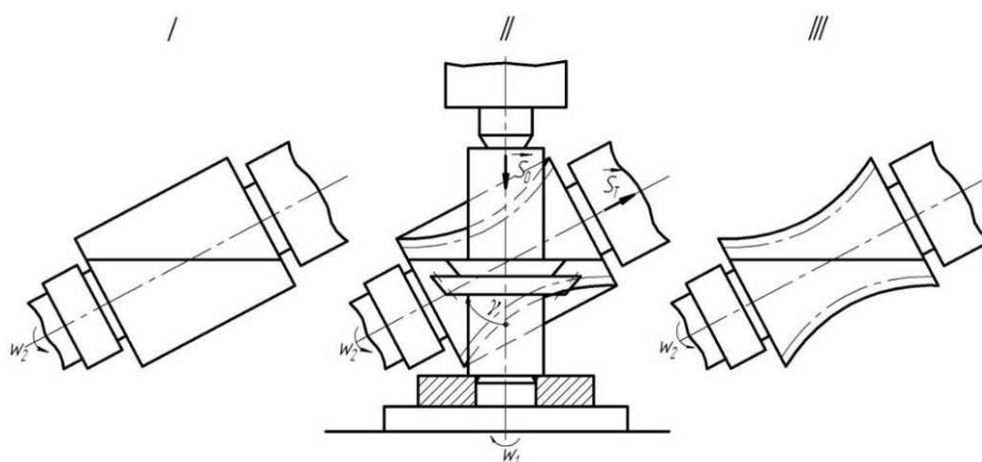


Рис. 6.2. Схема виготовлення гіперболоїдного зубчастого колеса

Нарізування зубців на гіперболоїдній заготовці здійснюють за два

переходи. На першому переході циліндричну заготовку встановлюють таким чином, що через її середній перетин проходить пряма, паралельна передній різальній кромці круглого різця. При цьому нарізується зовнішня поверхня однопорожнинного гіперболоїда. Діаметр круглого різця дорівнює діаметру кола западин інструментального зубчастого колеса. На другому переході гіперболоїдну заготовку опускають на величину рівну висоті круглого різця, таким чином, що передня грань циліндричного інструментального зубчастого колеса збігається з прямолінійною твірною однопорожнинного гіперболоїда [203]. Подальше формоутворення гіперболоїдного зубчастого колеса аналогічно формоутворенню, представленою на рис. 6.1.

За допомогою перерахованих вище способів виготовлення гіперболоїдних зубчастих коліс можна отримувати прямозубі зубчасті колеса. Але в механізмах дуже часто при одних габаритних розмірах необхідно міняти передавальне відношення. Отже, виникає необхідність нарізувати зубчасті колеса одного розміру з різним кутом нахилу зуба. Для цього був розроблений і запатентований спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс, представлений на рис. 6.3. Цей спосіб виготовлення гіперболоїдних зубчастих коліс за кінематикою аналогічний способам, представленим на рис. 6.1 і рис. 6.2. Відмінність способу полягає в тому, що при нарізуванні зубців додатково налаштовують гітару диференціала зубофрезерного верстата. В цьому випадку отримуємо можливість виготовити гіперболоїдні зубчасті колеса принципово нової геометрії, у яких лінія зуба відхиляється від прямолінійної твірної однопорожнинного гіперболоїда [204].

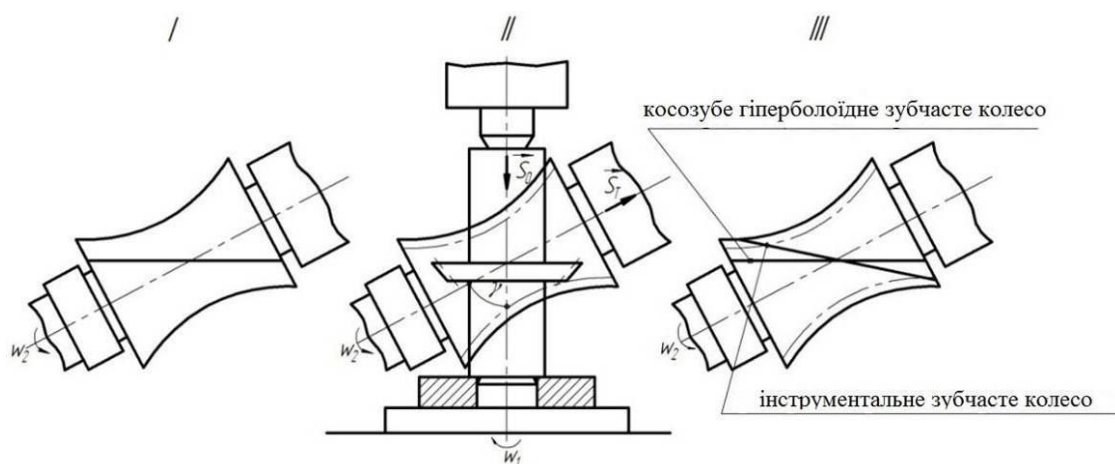


Рис. 6.3. Схема нарізування косозубих гіперболоїдних зубчастих коліс

Заготовка гіперболоїдного колеса має вигляд однопорожнинного гіперболоїда [54]. Такі заготовки можуть бути виготовлені за копіром (що викликає певні труднощі) або за допомогою дискового різця з торцевою різальною поверхнею на універсальному верстаті за схемою, показаною на рис. 6.4.

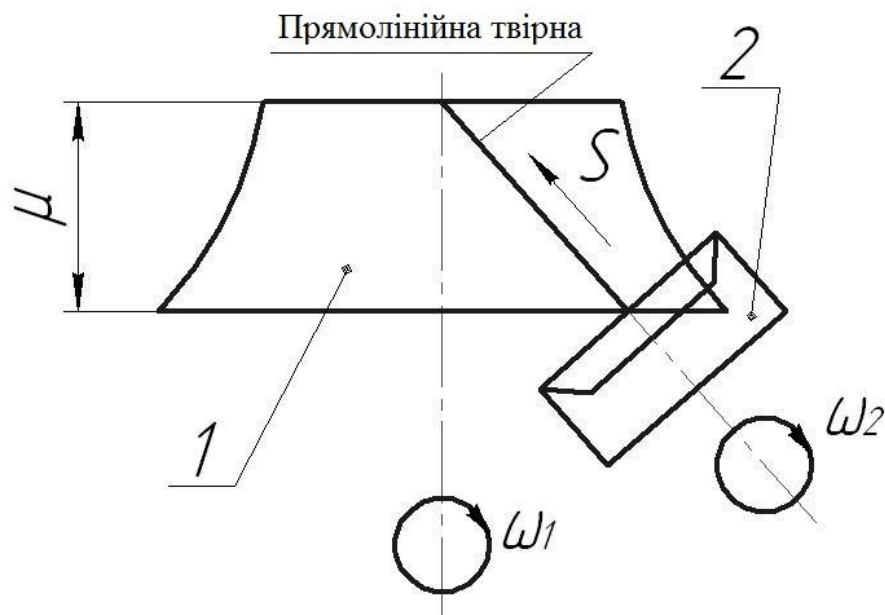


Рис. 6.4. Спосіб отримання однопорожнинного гіперболоїда дисковим різцем

Діаметр різця (різець можна замінити сектором) повинен дорівнювати діаметру западин прямозубого циліндричного колеса, тобто

$$d_r = d_d - 2,5m = m_n z_1 - 2,5m.$$

При цьому процес різання наступний: обертання заготовки 1 і різця 2 кінематично ув'язані за допомогою гітари ділення. Рух подачі S залежить тільки від режимів різання.

Зауважимо, що при виготовленні гіперболоїдної заготовки дисковим різцем, кругова різальна кромка описуватиме циліндричну твірну поверхню.

Знайдемо поверхню гіперболоїдної заготовки 1, яка при обертанні навколо своєї осі дотикалась би до циліндричної твірної поверхні, яку описує інструмент 2.

Для цього всій системі (гіперболоїдна заготовка – дисковий різець) дамо кутову швидкість, рівну і протилежну кутовій швидкості гіперболоїдної заготовки. В цьому випадку заготовка виявиться зупиненою, а вісь твірної поверхні буде обертатися навколо осі заготовки і ковзати по своєму напрямку. Цілком очевидно, що вісь твірної поверхні буде захоплювати за собою і весь циліндр (обертання якого навколо своєї осі можна, очевидно, до уваги не брати), огинаючи якого в цьому русі і є шуканою поверхнею. Тут ми маємо дуже просту задачу огинання, що дозволяє вирішити її на підставі простих міркувань. У будь якого випадку, повинно бути ясно, що шукана поверхня є поверхнею обертання. При зменшенні радіуса циліндра, тобто циліндричної твірної поверхні, до нуля ми отримаємо виріб у вигляді однопорожнинного гіперболоїда. На цій підставі можна стверджувати, що шукана поверхня, одержувана твірною циліндричною поверхнею, за своїм виглядом повинна нагадувати однопорожнинний гіперболоїд. Ці поверхні можна описати такими параметричними рівняннями:

$$\mu = -A_w \frac{\cos^z \gamma}{\sin \gamma} \operatorname{tg} \Psi - r \sin \gamma \sin \Psi \quad (6.1)$$

$$\rho = (A_w - r \cos \Psi) \sqrt{1 + \cos^z \gamma \operatorname{tg}^z \Psi}$$

де: A_w – міжосьова відстань;

r – радіус циліндра;

μ – поточна координата Z_1 (відстань від горлового перетину до того, що розглядається);

γ – кут схрещування осей;

ψ – параметр.

Підставляючи в рівняння (6.1) значення параметрів, визначимо шуканий радіус ρ в торцевому перерізі гіперболоїдної заготовки. Таким шляхом можна визначити всі проміжні радіуси ρ .

Проміжні значення ρ також можна знайти при вирішенні системи трансцендентних рівнянь. При цьому знаходяться координати X_1, Y_1 для кожного значення Z_1 і потім знаходиться поточний радіус заготовки:

$$\rho = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}.$$

Точіння гіперболоїдних заготовок і нарізування зубців виконувалися на зубофрезерних верстатах «Modul» і «Pfauter» на ВО «Луганськтепловоз» і на Луганському верстатобудівному заводі [57].

Для експерименту були прийняті такі геометричні параметри коліс гіперболоїдної передачі: циліндричне прямозубе зубчасте колесо з кількістю зубців $z_2 = 50$, гіперболоїдне зубчасте колесо з $z_1 = 40$, модуль нормальний прийнятий $m = 1,5$ мм і кут схрещування $\gamma = 120^\circ$.

При таких параметрах дільний діаметр горлового перетину заготовки дорівнює $d_a = \frac{mz_2}{\cos 60^\circ} = 120$ мм.

На рис. 6.5 зображено процес виготовлення за пропонованим способом.

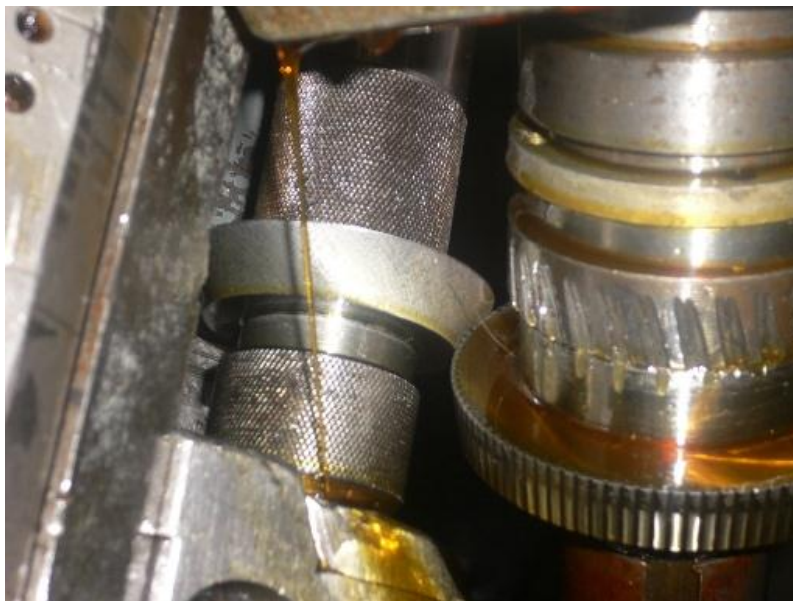


Рис. 6.5. Фото процесу виготовлення гіперболоїдної заготовки

Після отримання гіперболоїдної заготовки виконують нарізування зубців методом обкочування за допомогою циліндричних обкатних інструментів 2 (рис. 6.6). Нарізування гіперболоїдних заготовок можна здійснювати за допомогою стандартного довбача.

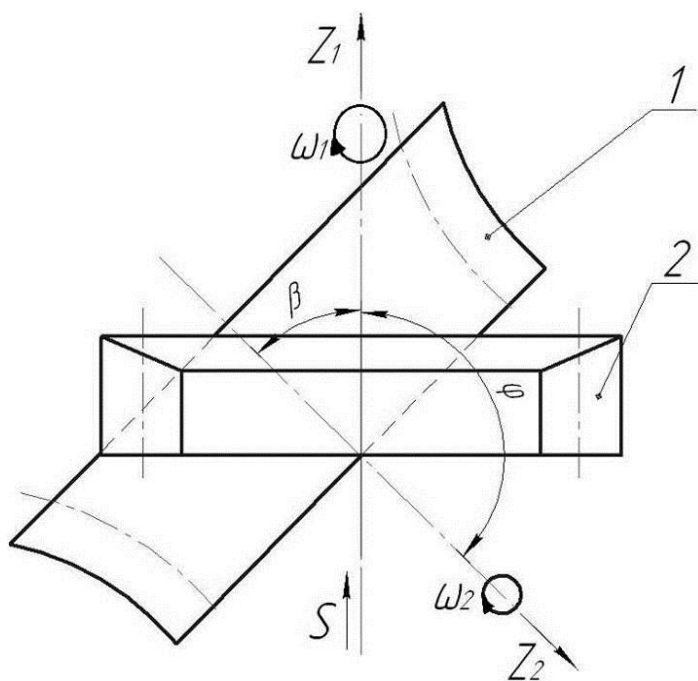


Рис. 6.6. Схема нарізування зубців гіперболоїдного колеса

Пропонований спосіб відрізняється тим, що вісь довбача встановлюють відносно колеса під кутом, рівним куту нахилу зубців колеса на ділильному циліндрі, а подачу колеса здійснюють уздовж осі довбача [52]. Такий спосіб забезпечує між основними поверхнями лінійний контакт в передачах з перехресними осями і підвищення навантажувальної здатності передачі. Заготовка нарізаного колеса закріплюється на оправці шпинделя верстата. У центрах стола верстата встановлюється і закріплюється прямозубий довбач з будь-якою кількістю зубців, вісь якого схрещується під кутом β (β – кут нахилу зубців колеса на ділильному циліндрі) з віссю нарізаного колеса. Кінематичний ланцюг настроювання верстата повинен забезпечувати передавальне відношення

$$\omega_k / \omega_\partial = z_\partial / z_k$$

де ω_k – кутова швидкість обертання колеса;

ω_∂ – кутова швидкість обертання довбача;

z_∂ – кількість зубців довбача;

z_k – кількість зубців нарізаного колеса.

При нарізуванні здійснюється подача колеса уздовж осі довбача. Зубчасті колеса, нарізані згідно даного способу, мають опукло-вигнуту бічну поверхню зубців, аналогічну з бічними поверхнями зубців черв'ячного колеса. Товщина зубців по дузі одного і того ж діаметру є змінною в різних торцевих перерізах колеса, збільшуючись від його середини до торців. Тому при роботі двох таких коліс в передачі з перехресними осями забезпечується більш щільне прилягання бічних поверхонь зубців. Таким чином, теоретично навантажувальна здатність зубчастих коліс, нарізаних згідно даного способу, є вищою, ніж у гвинтових коліс, нарізаних відомим способом.

Головним рухом різання є відносна швидкість ковзання $\vec{V}^{(12)}$ передніх ріжучих граней циліндричного обкатного інструменту 2 по поверхні зубців 1

на гіперболоїдній заготовці. Вищевказане відносне ковзання виходить за рахунок схрещування осей циліндричного обкатного інструменту 2 і гіперболоїдної заготовки 1 (рис. 6.6). Чим більший кут β , тим вища швидкість $\vec{V}^{(12)}$, тим кращі умови різання. Подача S в мм/об здійснюється вздовж прямої, яка схрещується з віссю обертання однопорожнинного гіперболоїда (уздовж осі інструменту 2) призначається в залежності від режимів різання. При цьому обертальний і поступальний рух циліндричного обкатного інструменту 2 не залежать одне від одного і тому є двома незалежними параметрами.

Зауважимо, що подача S в залежності від верстата, може задаватися гіперболоїдній заготівці паралельно прямій, яка схрещується з віссю обертання однопорожнинного гіперболоїда.

Описаний спосіб нарізування гіперболоїдних зубців може бути реалізований, наприклад, на зубофрезерних верстатах з протяжним супортом або без протяжного супорта.

Розглянемо нарізування зубців на гіперболоїдному колесі на зубофрезерному верстаті з протяжним супортом. Схема установки прямозубого колеса і гіперболоїдної заготовки наведена на рис. 6.6. Обертання відбуваються у напрямку годинникової стрілки і узгоджуються за допомогою гітари ділення шляхом підбору змінних шестерень за відомою формулою:

$$ac/bd = mk/Z, \quad (6.2)$$

де a, b, c, d – розрахункові зубчасті колеса гітари розподілу;

m – характеристика зубофрезерного верстату (4, 6, 12, 18, 24, 48);

k – кількість зубців на циліндричному інструменті;

Z – кількість зубців на нарізуваному колесі.

При застосуванні циліндричного косозубого обкатного інструменту необхідно налаштувати ще й гітару диференціалу.

Визначимо геометричні параметри нарізованого гіперболоїдного колеса і обкатного інструменту з наступними параметрами: $Z_2 = 6$; $m = 1,5 \text{ мм}$; $\beta = 81^\circ$. Торцевий модуль цього колеса

$$m_t = m / \cos 81^\circ = 1,5 / 0,1564 = 9,5908.$$

Діаметр діляльного кола гіперболоїдного колеса в горловому перетині $d_2 = m_t \cdot Z_2 = 9,5908 \cdot 6 = 57,54 \text{ мм}$. Зовнішній діаметр гіперболоїдного колеса в горловому перерізі:

$$d_{2a} = d_2 + 2,5m = 57,54 + 2,5 \cdot 1,5 = 61,29 \text{ мм}.$$

Внутрішній діаметр гіперболоїдного колеса в горловому перерізі:

$$d_{2f} = d_2 - 2,5 \cdot m = 57,54 - 2,5 \cdot 1,5 = 53,79 \text{ мм}.$$

Ширину гіперболоїдної основної поверхні знайдемо з умови загострення зубців на більшому торці однопорожнинного гіперболоїда. З умов міцності товщини зубців гіперболоїдної основної поверхні на їх вершинах не повинна бути менше допустимої величини. Зокрема, за рекомендацією І.І. Семенченка для евольвентних передач ця величина не повинна бути менше $(0,3 \dots 0,4) m$, де m – модуль зачеплення. Задачу про загострення покажемо на прикладі гіперболоїдного зубчастого колеса. У загальному випадку цю задачу вирішимо таким чином: задаємо z_2 ; оскільки межі зміни λ для обох сторін зубців гіперболоїдного колеса $\alpha - \alpha$ і $\beta - \beta$ відомі, то з одержуваного при цьому рівняння

$$z_2 = x_1 \sin \gamma \sin \varphi_1 + y_1 \sin \gamma \cos \varphi_1 + z_1 \cos \gamma,$$

яке приведенне до наступного вигляду:

$$z_2 = [f_1(\lambda, P_x) - r_1] \sin \gamma \sin \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \sin \gamma \cos \varphi_1 + \mu \cos \gamma = \text{const} \quad (6.3)$$

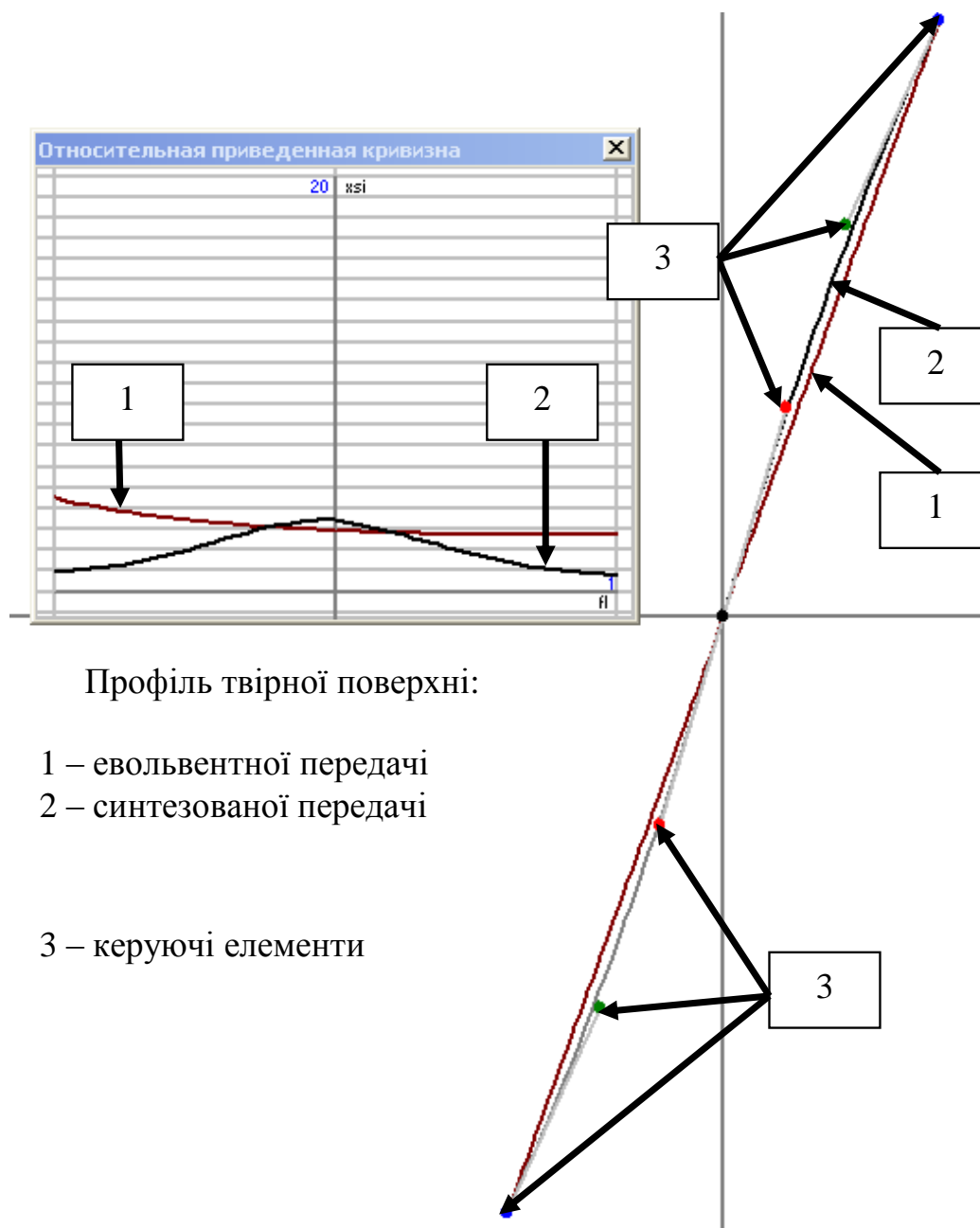


Рис. 6.7. Інтерфейс інтерактивного синтезу передачі у середовищі «SA|AT»

На рис. 6.7 наведено приклад інтерактивного синтезу. Крива 1 визначає

профіль твірної поверхні для виготовлення евольвентної передачі. За допомогою керуючих елементів ми змінюємо цей профіль і, одночасно, аналізуємо характер зміни відносної приведеної кривизни по всій робочій ділянці зубців передачі.

З копії екрану монітора видно, що на голівці і ніжці зуба відносна приведена кривизна зменшується в кілька разів, що значно зменшує контактні напруження на цих ділянках.

Для заданих λ в межах робочих ділянок профілів зубців визначаємо $\varphi_1(\lambda)$. При одержуваних значеннях $\varphi_1(\lambda)$ визначаємо x_2 , y_2 для профілів $\alpha - \alpha$ та $\beta - \beta$. Змінюючи z_2 і повторюючи обчислення, отримуємо сукупність кривих, що визначають профіль гіперболоїдного колеса при різних значеннях z_2 . При цьому для деякого значення z_2 одержувані криві, відповідні профілям $\alpha - \alpha$ і $\beta - \beta$, перетнуться, в наслідок буде мати місце загострення зубців нарізованого колеса. Далі, зменшуючи z_2 , можна отримати таку ширину гіперболоїдного колеса, на торцях якого товщина зубців на їх вершинах буде не менше заданої величини.

На практиці ширину гіперболоїдного колеса можна знайти таким чином. Отримавши гіперболоїдну заготовку певної ширини, нарізають на ній зубці за допомогою циліндричного інструментального колеса (рис. 6.8). При збільшеній ширині гіперболоїдної заготовки на більшому торці відбудеться загострення зубців (витків).

Тоді виміром знаходять місце, де ширина зуба дорівнює рекомендованим вимогам. Загострену частину зубців гіперболоїдного колеса видаляють будь-яким технологічним способом.



Рис. 6.8. Фото нарізування зубців гіперболоїдного колеса на верстаті «Pfauter»

На рис. 6. 9 зображені виготовлені гіперболоїдні зубчасті колеса [44].



Рис. 6.9. Фото гіперболоїдних зубчастих коліс

6.1.2. Виготовлення гіперболоїдних фрез

Для перевірки результатів теоретичних досліджень була запропонована нова стратегія формоутворення гіперболоїдних зубчастих інструментів, захищена патентом [205].

На рис. 6.10, рис. 6.11 і рис. 6.12 показані процеси нарізання гіперболоїдного інструменту спеціально спрофільованим твірним колесом з раціональними геометричними параметрами.

Розглянуто різні стратегії формоутворення і відпрацьовані технології виготовлення гіперболоїдних інструментів.

Встановлено, що кут схрещування гіперболоїдного інструменту з колесом повинен лежати в межах $\gamma = 90^\circ \dots 120^\circ$.



Рис. 6.10. Нарізування витків при осьовій подачі S_o

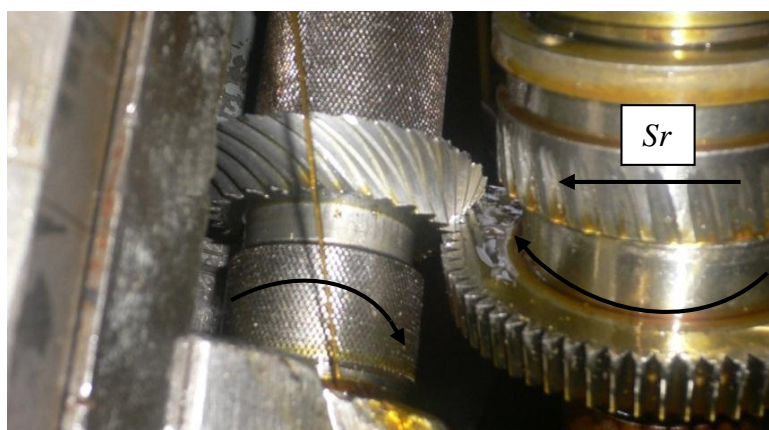


Рис. 6.11. Нарізування витків при радіальній подачі S_r

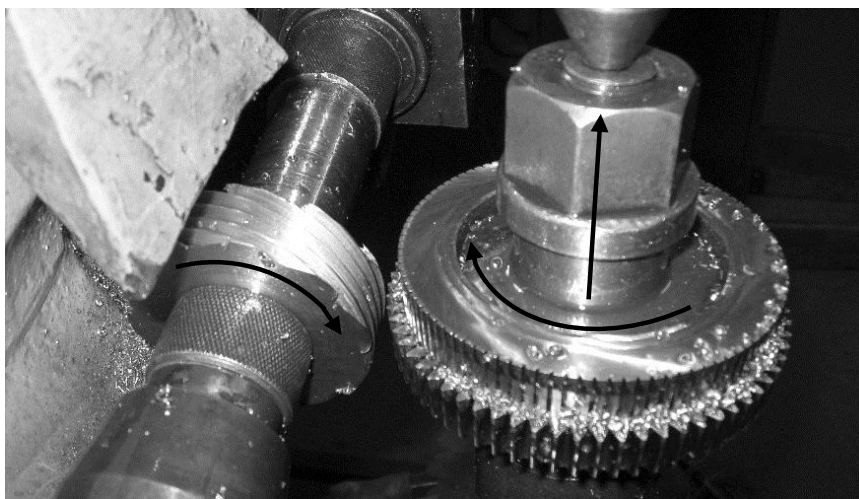


Рис. 6.12. Комбінований метод механічного оброблення

Для того, щоб перетворити гіперболоїдну заготовку з нарізаними витками в гіперболоїдну фрезу, необхідно фрезерувати стружкові канавки (рис. 6.13).

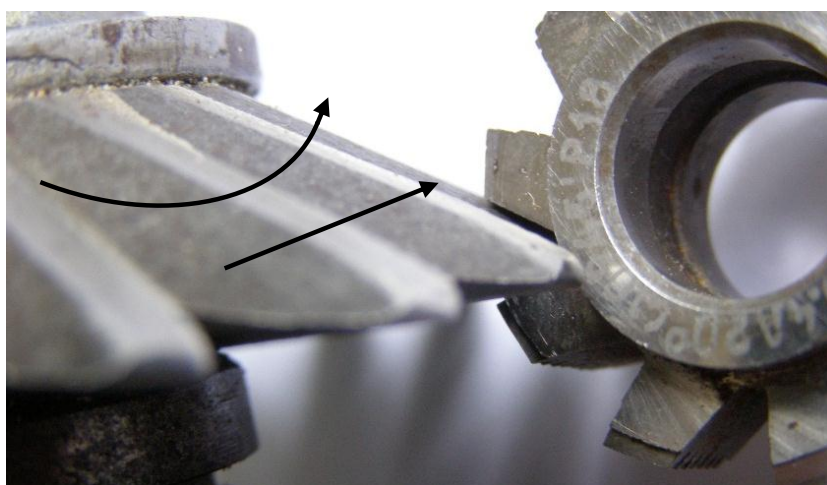


Рис. 6.13. Фрезерування стружкових канавок

На рис. 6.14 і рис. 6.15 наведені різні конструкції виготовлених гіперболоїдних фрез для нарізування циліндричних зубчастих коліс.

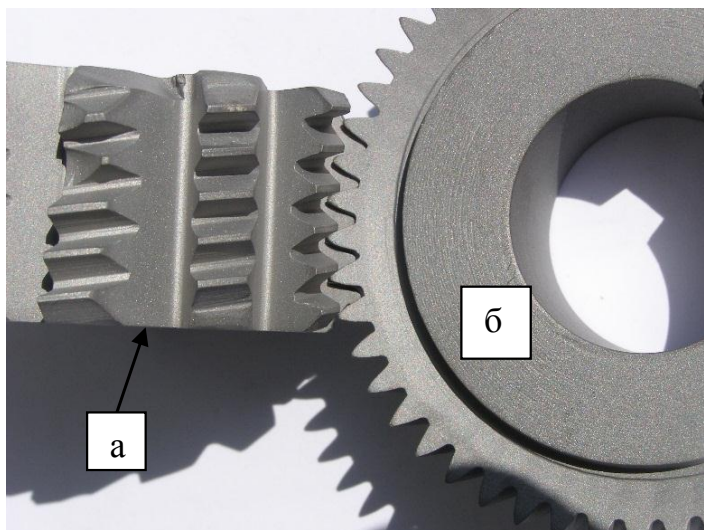


Рис. 6.14. Гіперболоїдна фреза (а) і довбач (б)

Практично, було підтверджено, що такий інструмент не вимагає затилування, що знижує собівартість його виготовлення до 70%. Крім того, використання багатозахідних гіперболоїдних фрез замість черв'ячних дозволяє підвищити продуктивність нарізування зубців до 30%.

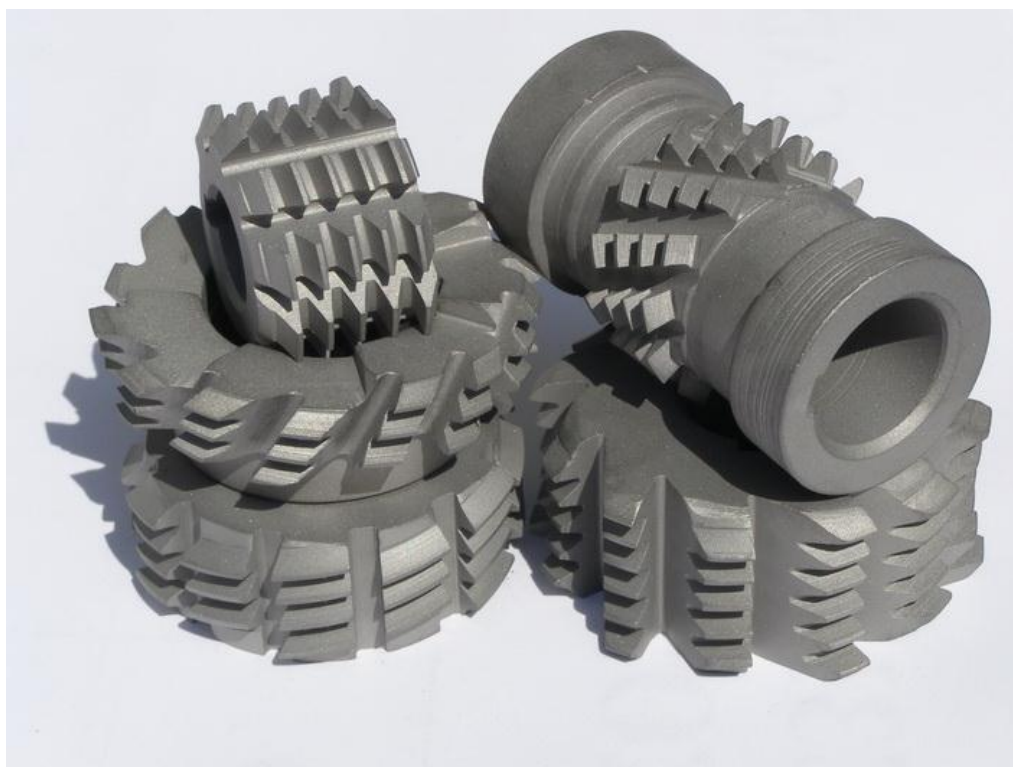


Рис. 6.15. Фото гіперболоїдних фрез для нарізування циліндричних зубчастих коліс

6.1.3. Особливості виготовлення зуборізних довбачів

На практиці величезна кількість зубців зубчастих коліс нарізується за допомогою зуборізних довбачів [49]. Цей досить продуктивний спосіб нарізування зубців застосовується, перш за все, через конструктивні параметри деталі, тому що іншими методами нарізати на них зубці неможливо.

При виготовленні зуборізних довбачів найбільш складним є процес їх заточування по задніх поверхнях, який значною мірою змінює евольвентний профіль зуба на такому інструменті. Чим більше задні кути на довбачі, тим краще він утворює форму оброблюваної заготовки, проте дуже сильно відхиляє профіль нарізаного зуба від теоретичного.

Відомі збірні довбачі, технологія виготовлення яких полягає в тому, що зубці довбача обробляють в технологічному пристрої, геометрія якого відрізняється від геометрії збірного довбача. Крім того, такий інструмент вимагає якісного складання і налагодження, що в значній мірі залежить від кваліфікації робітників, якості та точності технологічного обладнання і оснащення.

Останнім часом широко застосовуються зуборізні довбачі з похилою віссю [184]. В цьому випадку довбач не вимагає дорогої і трудомісткої операції затилювання. Однак при цьому доводиться робити модернізацію зубодовбального верстата, а сам довбач необхідно виготовляти з неевольвентним профілем в нормальному перетині, для чого доводиться вводити певну корекцію в форму зуба.

Для усунення цих недоліків була розроблена принципово нова схема формоутворення зуборізних інструментів в просторовому верстатному зачепленні. Зуборізний довбач базується на однопорожнинному гіперболоїді обертання. Однак береться не весь гіперболоїд, а тільки одна його частина – половина гіперболоїда. Витки такої основної інструментальної поверхні мають властивість ставати тоншими від торцевого перетину до горловини, що автоматично створює задні кути по бічній і зовнішній поверхні такого

інструменту. Це призводить до різкого скорочення трудомісткості і собівартості виготовлення інструменту, а також до значного підвищення його точності. Стійкість такого інструменту значно вище, він допускає велику кількість переточувань. Крім того, заточування цього інструменту по передній поверхні можливе під будь-яким кутом, що значною мірою покращує умови різання металу. Передня різальна кромка повністю за своєю формою збігається з основною інструментальною поверхнею. Ширина пропонованого інструменту за конструктивними параметрами така саме, як і у стандартних зуборізних інструментів. Схема такого інструменту представлена на рис. 6.16.

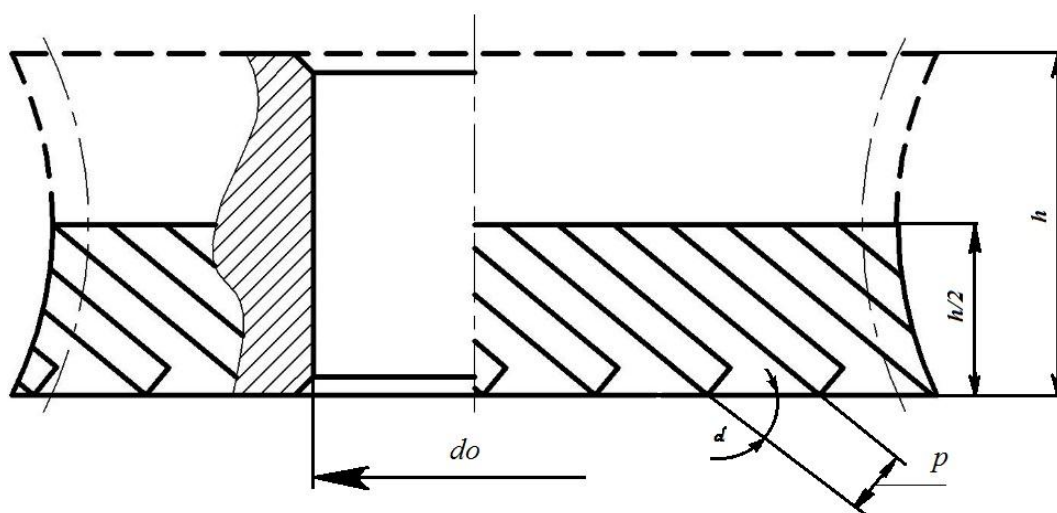


Рис. 6.16. Гіперболоїдний зуборізний довбач

Застосування запропонованого інструменту має недолік, який полягає в тому, що потрібна незначна модернізація зубодовбального верстату. Сама технологічна операція виготовлення зуба аналогічна технологічній операції при нарізанні зубців стандартними довбачем.

При виготовленні зубчастих коліс інструментом, вісь якого схрещується з віссю оброблюваного зубчастого колеса, виникають значні за величиною швидкості ковзання зубців. Швидкість ковзання, в цьому випадку, є головним рухом різання. Отже, цей кінематичний показник має домінуючий вплив на процес різання.

Відносну швидкість ковзання точки, жорстко пов'язаної з нарізаним

зубчастим колесом, щодо тієї ж точки контакту, жорстко пов'язаної з зуборізним довбачем, визначимо таким чином:

$$\vec{V}_2 - \vec{V}_1 = \vec{V}_{12},$$

Тут: V_1 – швидкість точки контакту на зубчастому виробі, який нарізується;

V_2 – швидкість точки контакту на зуборізному довбачі.

Після нескладних перетворень визначимо проекції відносної швидкості ковзання на декартові осі координат в такому вигляді:

$$\begin{aligned} V_x^{(12)} &= -y_1(1 - u_{21} \cos \gamma) - z_1 u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - A u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1; \\ V_y^{(12)} &= (x_1 - r)(1 - u_{21} \cos \gamma) + z_1 u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - A u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1; \\ V_z^{(12)} &= -u_{21} \sin \gamma [(x_1 - r) \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + A]. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Остаточно формула відносної швидкості ковзання може бути записана в такому виді:

$$\begin{aligned} V_{12} &= \{y_1(u_{21} \cos \gamma - 1) - z_1 u_{21} \sin \gamma \cos \varphi_1 - A u_{21} \cos \gamma \sin \varphi_1 (x_1 - r) \times \\ &\times (1 - u_{21} \cos \gamma) + z_1 u_{21} \sin \gamma \sin \varphi_1 - A u_{21} \cos \gamma \cos \varphi_1 \times \\ &\times u_{21} \sin \gamma [(x_1 - r) \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 + A]\}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Від того, як спрямована ця швидкість за профілем нарізуваного зуба залежить якість перебігу процесу різання. Якщо кут між відносною швидкістю ковзання і напрямком контактної лінії буде дорівнювати 0° то умови різання будуть найсприятливішими, і інструмент матиме оптимальну геометричну форму. Якщо кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактної лінії буде дорівнює 90° , то такий інструмент не буде нарізувати зуб, а буде його накочувати. В цьому випадку необхідно проектувати інструмент для обробки металів тиском.

У даній роботі кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактної лінії визначається таким чином:

$$\operatorname{tg} \nu_{\tau} = |[\vec{\tau}_1 \times \vec{V}_{12}]| / (\vec{\tau}_1, \vec{V}_{12}), \quad (6.6)$$

Тут чисельник виразу являє собою модуль векторного добутку векторів $\vec{\tau}_1, \vec{V}_{12}$:

$$|[\vec{\tau}_1 \times \vec{V}_{12}]| = |\vec{\tau}_1| |\vec{V}_{12}| \sin \nu_{\tau}, \quad (6.7)$$

а знаменник цього виразу являє собою скалярний добуток цих векторів:

$$(\vec{\tau}_1, \vec{V}_{12}) = |\vec{\tau}_1| |\vec{V}_{12}| \cos \nu_{\tau}. \quad (6.8)$$

Одиничний вектор дотичної до контактної лінії $\vec{\tau}_1$ лежить в дотичній площині до поверхні нарізованого зуба і складається з векторів $\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k}$ и $\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}$ розташованих в тій же дотичній площині.

Тому:

$$\vec{\tau}_1 = \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \frac{\partial F}{\partial \psi} - \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \frac{\partial F}{\partial k} = a \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} + b \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}. \quad (6.9)$$

Чисельник виразу (6.6) з урахуванням виразу (6.9) набуває вигляду:

$$[\vec{\tau}_1 \times \vec{V}_{12}] = \left[\left(a \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} + b \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \right) \times \vec{V}_{12} \right] = a \left[\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \times \vec{V}_{12} \right] + b \left[\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \times \vec{V}_{12} \right]. \quad (6.10)$$

Знаменник виразу (6.6) з урахуванням виразу (6.10) набирає вигляду:

$$\begin{aligned}
 (\vec{\tau}_1, \vec{V}_{12}) &= \left(a \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} + b \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}, \vec{V}_{12} \right) = \left(a \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k}, \vec{V}_{12} \right) + \\
 &+ \left(b \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}, \vec{V}_{12} \right) = a \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k}, \vec{V}_{12} \right) + b \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}, \vec{V}_{12} \right).
 \end{aligned}
 \quad (6.11)$$

З урахуванням виразів (6.10) і (6.11) кут між вектором швидкості ковзання і напрямком контактних ліній набуде вигляду:

$$\operatorname{tg} \nu_\tau = \left| a \left[\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \times \vec{V}_{12} \right] + b \left[\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \times \vec{V}_{12} \right] \right| / \left[a \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k}, \vec{V}_{12} \right) + b \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}, \vec{V}_{12} \right) \right]. \quad (6.12)$$

Перетворимо останній вираз шляхом розкладання вектору \vec{V}_{12} за двома взаємно перпендикулярними напрямками вздовж лінії зуба $\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k}$ і $\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi}$, в результаті отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \nu_\tau &= \left\{ -\frac{\partial F}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \vec{V}_{12} \right) [(x'_1)^2 + (\bar{y}_1)^2] - \frac{\partial F}{\partial k} \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \vec{V}_{12} \right) \right\} / \\
 &/ \left[\frac{\partial F}{\partial k} \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \vec{V}_{12} \right) - \frac{\partial F}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \vec{V}_{12} \right) \right] \sqrt{(x'_1)^2 + (\bar{y}_1)^2}.
 \end{aligned}
 \quad (6.13)$$

З виразу (6.13) випливає, що кут ν_τ дорівнює 0° при:

$$-\frac{\partial F}{\partial \psi} [(x'_1)^2 + (y'_1)^2] \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial \psi} \vec{V}_{12} \right) - \frac{\partial F}{\partial k} \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial k} \vec{V}_{12} \right) = 0. \quad (6.14)$$

В цьому випадку умови різання будуть найсприятливішими, отже, саме на основі такої основної інструментальної поверхні необхідно конструювати зуборізний довбач.

Кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній змінюється в широких межах в залежності від геометрії зуборізного довбача і геометрії нарізуваного зубчастого колеса. Аналіз цього геометричного показника дозволив визначити оптимальну геометрію зуборізних інструментів в залежності від конструкції нарізуваного зубчастого виробу. Зміна цього показника представлено на рис. 6.17.

Зміна величини кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактної лінії лежить в широких межах і може коливатися в межах від $+ 90^0$ до $- 90^0$ в залежності від геометрії і кінематики процесу нарізування зубців. З графіків видно, що цей показник для одного і того ж інструмента коливається в широких межах і змінює свій напрямок. Так для зуборізного довбача з кількістю зубців $z=18$ відносним є кут схрещування осей виробу та інструменту $\gamma = 12^0$. Для цього кута вибирається діаметр зуборізного довбача. Для інструменту з кількістю зубців $z=14$ оптимальний кут схрещування осей рівний 21^0 . Як в першому, так і в другому випадку досліджуваний геометричний показник змінює свій знак.

Такий стан пояснюється зміною напрямку ковзання контактуючих поверхонь за профілем зуба. Для інструменту з числом зубців $z=9$ оптимальним кутом схрещування осей є кут 32^0 . При обробці зубців таким інструментом поздовжня подача не змінює свого напрямку за профілем зуба, що дуже важливо. В цьому випадку вирівнюються зусилля при обробці, а сам процес відбувається більш плавно. Аналіз розглянутих кутів при різній ширині гіперболоїдних інструментів показує, що вони практично однакові як для горлового, так і крайнього перетину однопорожнинного гіперболоїда.

Завдяки дослідженню та аналізу кута між вектором швидкості ковзання і напрямком контактної лінії можна прогнозувати якість процесу нарізування зубців. Такий стан значною мірою скорочує обсяг експериментальних досліджень і дозволяє на стадії проектування прогнозувати працездатність інструменту.

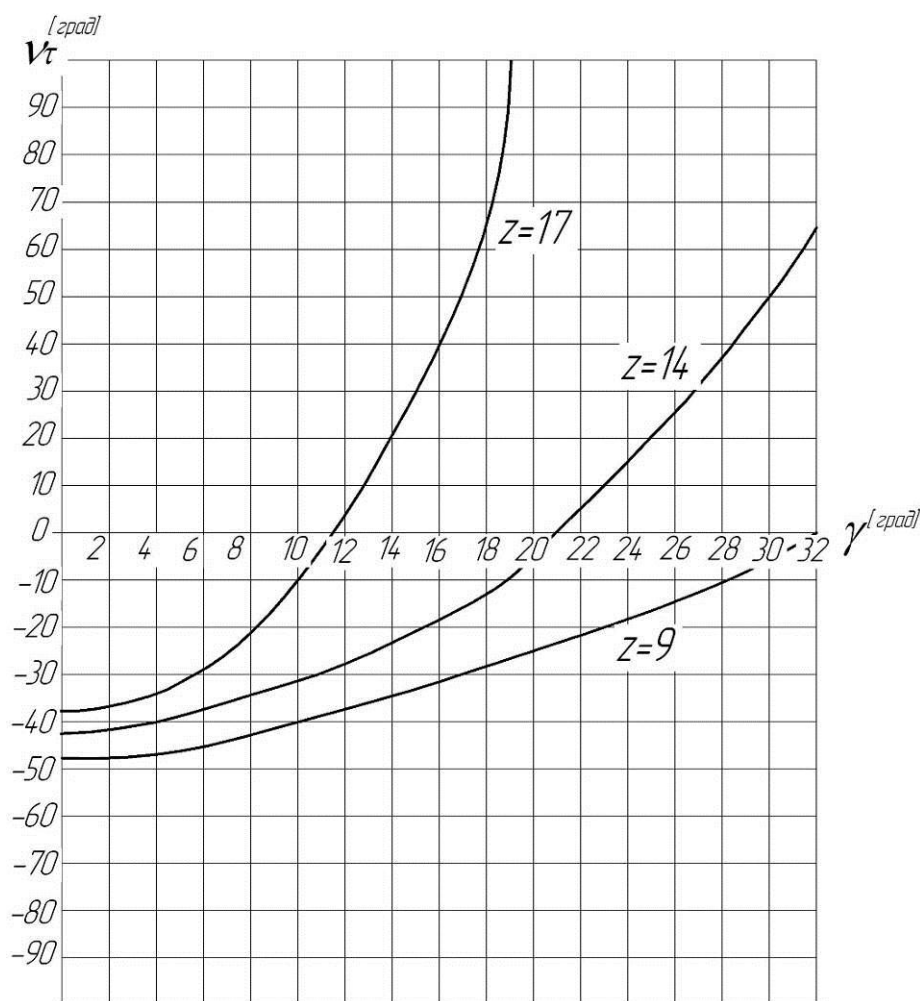


Рис. 6.17. Графік величини кута між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактної лінії

Після вибору правильної геометрії зуборізних довбачів на серійних зубофрезерних верстатах була виготовлена основна інструментальна поверхня. Передні кути на такому інструменті були виготовлені в лабораторії СНУ ім. В. Даля на вертикально фрезерному напівавтоматі за допомогою стандартної пальцевої фрези, як показано на рис. 6.18. Для цього була використана стандартна ділильна головка.

Найбільш простою формою передньої поверхні спроектованого інструменту є площина. На практиці, якщо прийняти передню поверхню у вигляді паралельної до осі такого інструменту площини, то видно, що статичний передній кут на правій різальній кромці буде позитивним, а на лівій – негативним. З конструкції інструменту видно, що чим більшим є кут

нахилу зуба на вихідній інструментальній поверхні, тим більша різниця цих кутів, що призводить до значної відмінності сил різання по правій і лівій сторонах зуба. Отже, передня поверхня пропонованого інструменту не може бути загострена по площині перпендикулярній до осі.



Рис. 6.18. Фото виготовлення передньої ріжучої грані зуборізного довбача

В даному дослідженні передня поверхня проєктованих довбачів буде перпендикулярна гвинтовій поверхні, а кут її нахилу буде дорівнювати куту підйому витка вихідної інструментальної поверхні при вимірюванні його на ділільному діаметрі самого вузького перетину інструменту. В цьому випадку виходять однакові за величиною статичні передні кути на бічних кромках інструмента. Кут нахилу передньої ріжучої кромки (передній кут) може бути будь-яким, залежить від матеріала інструмента і матеріала зубчастого колеса. Після термічної обробки передню поверхню на довбачі обробили на заточувальному верстаті. За допомогою запропонованої технології були

отримані гіперболоїдних довбачі з $m_n = 1,5\text{мм}$ і кутом нахилу зуба від 7° до 45° .

6.1.4. Технологічні особливості виготовлення гіперболоїдного інструмента для фінішної обробки зубчастих коліс

Основним завданням проектування інструменту, заснованого на схемах формоутворення 3-го класу для фінішного оброблення зубчастих коліс, є визначення профілю зовнішньої поверхні і профілю бічних витків цього інструменту [53].

Профіль бічної поверхні такого зуба являє собою криву лінію, описати яку можна за допомогою теорії зубчастих зачеплень. При визначенні профілю інструменту теорія зачеплення розглядає питання отримання поверхні зуба за допомогою спряженої поверхні, а на практиці утворення спряженої поверхні здійснюється методом обкочування, причому не поверхнями, а лініями, що являють собою різальні кромки інструмента.

При визначенні профіля інструмента дослідники приймають низку припущень, які спотворюють теоретично коректний профіль [157]. В результаті виходить зачеплення циліндричного зубчастого колеса з евольвентним профілем зубців з черв'ячним шліфувальним кругом. Тому профілювання і виготовлення абразивного інструменту має здійснюватися в просторовому верстатному зачепленні, що дозволяє уникнути похибок профіля такого інструменту і максимально наблизитися до теоретичної форми.

Для знаходження профіля гіперболоїдного інструмента для фінішної обробки зубчастих коліс в просторовому верстатному зачепленні необхідно осі шліфувального круга і оброблюваного зубчастого колеса повернути під певним кутом, привести в погоджене обертання і дати подачу зубчастому колесу вздовж своєї осі. В результаті таких рухів форма зовнішньої поверхні шліфувального круга виявляється у вигляді однопорожнинного гіперболоїда обертання, а профіль зубців такого інструмента розташовується в площині, перпендикулярній до твірної однопорожнинного гіперболоїда (рис. 6.19).

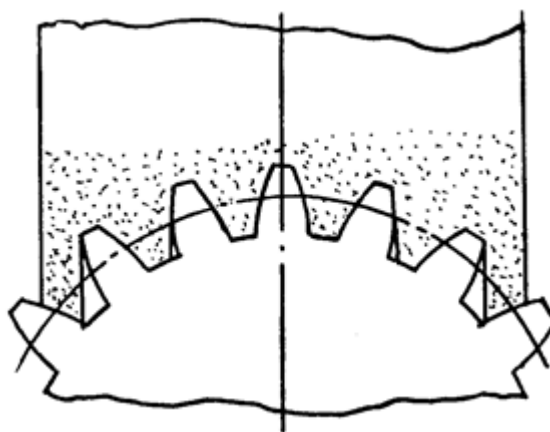


Рис. 6.19. Профілювання абразивного гіперболоїдного інструменту

Такий інструмент дозволяє за допомогою методу обкочування формувати зубці циліндричних зубчастих коліс. Природно, така геометрія інструмента і кінематика процесу обробки дозволяє значно підвищити продуктивність обробки зубців зубчастих коліс, так як інструмент виходить багатозахідним. Схема оброблення зубчастих коліс за допомогою такого інструменту має вигляд (рис. 6.20).

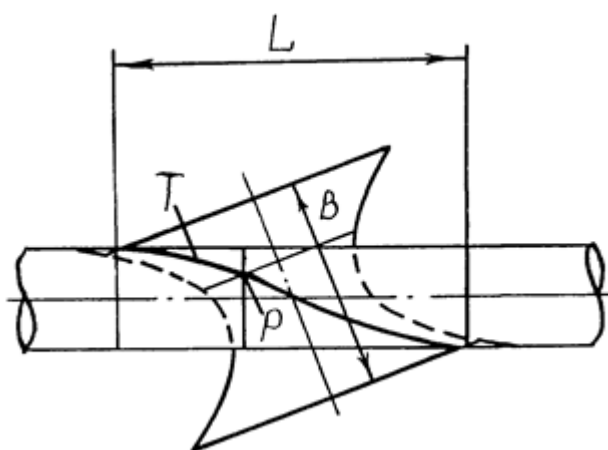


Рис. 6.20. Схема обробки зубців циліндричного зубчастого колеса

Після гартування циліндричних зубчастих коліс необхідно усунути похибки і деформації, отримані зубцями колеса під час термічного обробки. В цьому випадку необхідно отримати стабільну і високу якість зуба, яка значною мірою залежить від якості абразивного інструменту та технології

обробки зубчастих коліс.

У промисловості зубці коліс обробляють за допомогою методу обкочування, який є найточнішим і продуктивним методом обробки зубчастих коліс. При цьому зубчасте колесо зміщується в осьовому напрямку відносно циліндричного абразивного черв'яка для того, щоб бічні сторони зуба шліфувалися за всією шириною зубчастого колеса. Існуюча технологія дозволяє вести обробку зуба колеса за допомогою абразивного черв'яка, при якій між інструментом і колесом є точкове торкання, що знижує продуктивність обробки через термічні перевантаження на оброблюваному колесі. Крім того, профілювання черв'ячного шліфувального круга, як правило, здійснюється при плоскому верстатному зачепленні.

В роботі розглядається шліфування зубців циліндричних зубчастих коліс за допомогою багатозахідних шліфувальних кругів на зубошліфувальних верстатах, що працюють за методом обкочування. При цьому виникає питання правки шліфувальних кругів. Цей процес може здійснюватися за допомогою різних методів. Так, наприклад, в масовому або великосерійному виробництві для викочування гіперболоїдних шліфувальних кругів виготовляється алмазний накатник, геометрія і профіль якого повністю відповідають геометрії і профілю циліндричного зубчастого колеса. Схема такої обробки показана на рис. 6.21,а.

Для виправлення шліфувальних кругів в одиничному і дрібносерійному виробництві спосіб, представлений на рис. 6.21,а, не годиться, тому що має високу собівартість. Тому пропонуються методи, показані на рис. 6.21,б і рис. 6.21,в. За схемою (рис. 6.21,б) проводиться правка витків шліфувального круга. Виготовлюваний гіперболоїдний шліфувальний круг закріплюється на шпинделі верстата, який повертається на кут, що залежить від кількості зубців (витків кола), модуля і ділильного діаметра шліфувального круга в горловому перетині. Дисковий інструмент закріплюють на обертовому столі верстата таким чином, щоб він обертався навколо своєї осі, розташованої паралельно верхньої поверхні столу, а середня площина обертання дискового

інструменту проходить через діаметр столу верстата. При перерахованих вище рухах дисковий інструмент працює аналогічно різцю–летючці, за допомогою якого нарізають черв'яки і черв'ячні колеса. Змінюючи відстань дискового інструменту від осі столу верстата, можна за допомогою одного і того ж дискового інструменту профілювати гіперболоїдні шліфувальні круги різної геометрії. За схемою, представленою на рис. 6.21,в, профілюють зовнішню поверхню гіперболоїдних шліфувальних кругів. Змінюючи відстань різця–летючки від осі обертання столу верстата, отримують зовнішню поверхню гіперболоїдних шліфувальних кругів різної геометрії.

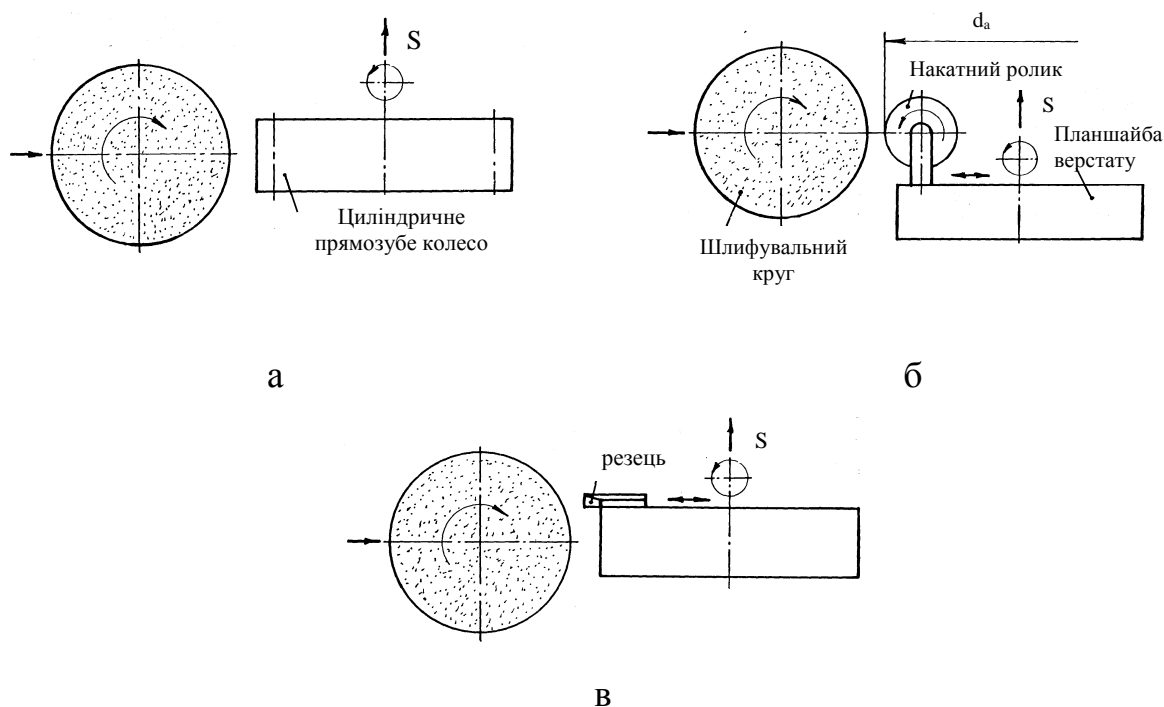


Рис. 6.21. Схеми профілювання і виправлення абразивних шліфувальних кругів інструментами з алмазним покриттям: а – за допомогою інструменту, типу «зубчасте колесо»; б – за допомогою накатних роликів; в – за допомогою різців

Так, за допомогою описаної вище технології виготовлення шліфувальних кругів для дрібносерійного виробництва, був виготовлений шліфувальний круг з такими параметрами: $m_n=1$ мм., $z_2=20$ (кількість заходів шліфувального круга), $d_d=270$ мм. – діаметр ділильного кола,

$\psi = 4^{\circ}15'$ – кут нахилу витка шліфувального круга. При цьому гітара поділу зубошліфувального верстата налаштовувалася за такою залежністю: $k/z_2/z_1 = 48 \cdot 27 / 100 \cdot 25$. Тут: k – характеристика верстату; $z_1 = 270$ – кількість зубців оброблюваного колеса.

Ширина шліфувального круга визначалася за такою залежністю: $B = 270 \tan 4^{\circ}15' = 20$ мм. За допомогою отриманого шліфувального круга були оброблені зубці циліндричних прямозубих зубчастих коліс з $m_n = 1$ мм і кількістю зубців $z_1 = 270$. Схема обробки зубців за допомогою отриманого кола представлена на рис. 6.22.



Рис. 6.22. Фото шліфування зубців (а) зубчастого колеса за допомогою гіперболоїдного круга (б)

6.1.5. Виготовлення та використання гіперболоїдних накатників

Після накатки зубців існуючим в промисловості інструментом профіль їх бічних поверхонь значною мірою відрізняється від теоретичного [28], [59]. Основним недоліком традиційної накатки зубців є те, що на бічній поверхні накатаного зуба в області основного кола виникають дефекти. Так на одному боці зуба з'являється виступ, а на іншому – западина. Експериментом встановлено, що величина цього виступу для невеликих зубчастих коліс може сягати 0,3 мм. Цей виступ значною мірою спотворює профіль

накатаного зуба, який докорінно відрізняється від теоретичного. Тому для виправлення ситуації вводять додаткову технологічну операцію, таку як зубошліфування, яка виправляє цей дефект. Це значною мірою збільшує собівартість виготовлених зубців, але, найголовніше, видаляється зміцнений шар на поверхні зуба, що мінімізує ефект від накатки.

Весь сучасний накатний інструмент виготовляється на базі циліндричного основного черв'яка, а інструмент, розглянутий в даному дослідженні, на базі гіперболоїдного основного черв'яка. Зубці на гіперболоїдному накатному інструменті вперше були нарізані за допомогою дискового інструменту на сучасному верстатному обладнанні з ЧПК. На такому обладнанні були виготовлені дрібномодульні накатники з $m_n = 1$ мм та різною кількістю заходів. За допомогою таких накатників були накатані циліндричні прямозубі та косозубі зубчасті колеса з різною кількістю зубців. На наступному етапі дослідження визначалася якість зубців у накатаних зубчастих колесах.

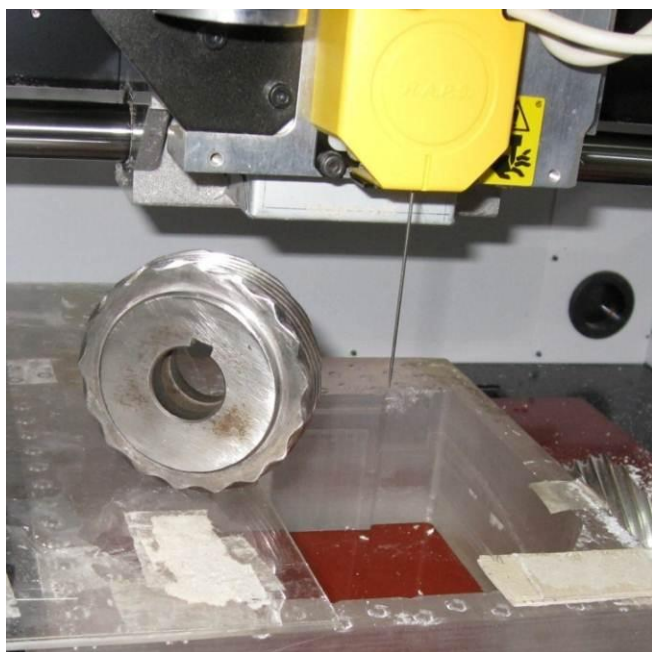
Для контролю якості обробленого зуба було використано сучасне сканувальне обладнання Roland MDX. На цьому обладнанні в роботі були піддані контролю дрібномодульні зубчасті колеса з модулем нормальним $m_n = 1$ мм і різною кількістю зубців. Схема такого контролю представлена на рис. 6.23.

Контроль профілю здійснюється за допомогою скануючої головки, оснащеної новітнім активним п'єзосенсором, що дозволяє сканувати об'єкти тонше за людську волосину передаючи найбільш докладні зміни форми. Програмне забезпечення для скануючої головки дозволяє як установка скануючої точки, так і можливість задавати як одну, так і декілька областей сканування. Оцифрований зуб накатаного зубчастого колеса зберігається у форматі PIX (хмара точок) і експортується в такі загальнодоступні формати, як: STL; DXF; WRL; 3DMF; 3DS; IGS.

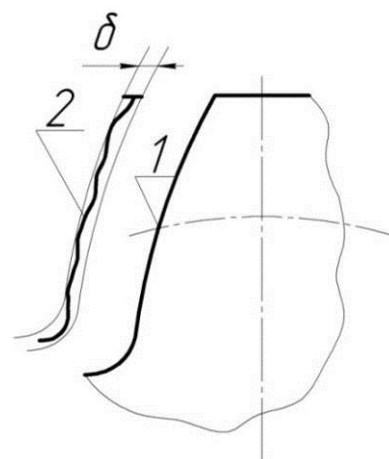
При контролі поверхні зуба було вибрано роздільну здатність з кроком 0,002 мм/крок. Швидкість переміщення скануючої головки уздовж осей X, Y

складала 0,150 мм/с, а вздовж осі Z – 0,130 мм/с. В результаті таких вимірювань були проаналізовані виміри 30-ти різних зубчастих коліс.

На першому етапі дослідження були розглянуті зубчасті колеса з кількістю зубців $z_1=50$ і 68, накатаних за допомогою стандартних циліндричних зубчастих накатників з $m_n = 1$ мм і кількістю зубців $z_2=67$.



б)



б)

Рис. 6.23. Фото контролю профілю накатаного зуба (а) і поле допуску на похибку (б)

Дослідження характеру спотворення профілю зуба показало, що на зубі явно видно хвилю пластично деформованого металу, а також западину вздовж його профілю, явно спотворюючих накатаний зуб. Характер спотворювання профіля зуба [59] показаний на рис. 6.24.

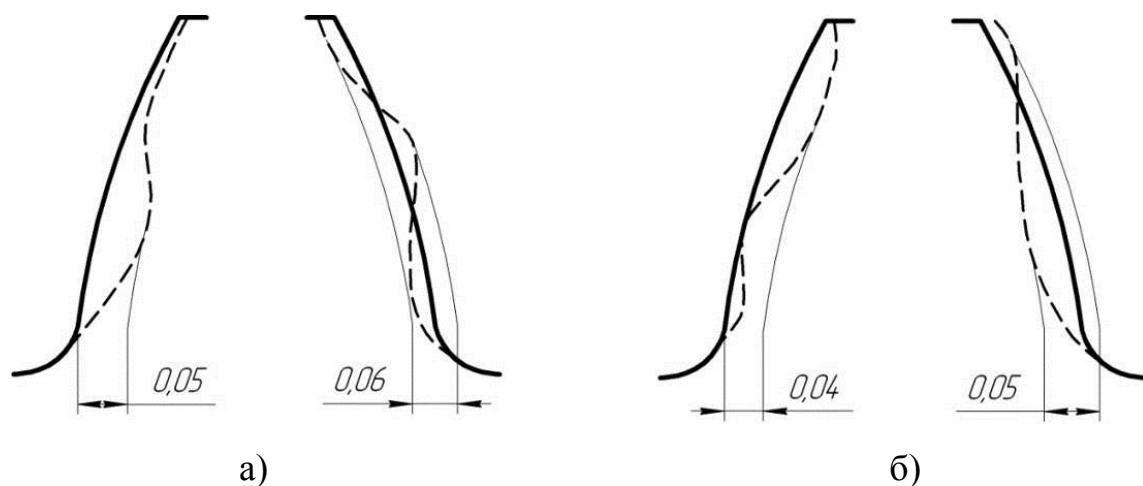


Рис. 6.24. Характер спотворення профілю зуба, накатаного стандартним накатним інструментом:

а – за годинниковою стрілкою; б – в зворотному напрямку

Далі в дослідженні був проведений контроль профіля 20-ти зубчастих коліс з $m_n=1\text{мм}$; кількістю зубців $z_1=50, 68, 100$, накатаних за допомогою гіперболоїдних накатників з кількістю зубців $z_2=17, 29$. Дослідження профілю накатаних зубців показало відсутність хвилі пластично деформованого металу, а, отже, і спотворення профілю зуба. На зубі помітне незначне огранювання, обумовлене подачею накатного інструменту. Відхилення профілю накатаного зуба від теоретичного зменшилося в 4...6 разів, що видно з рис. 6.25.

Після вибору оптимального за конструкцією накатного інструменту і знаходження оптимального зусилля накатування було проведено дослідження впливу шорсткості попередньо нарізаних зубців (вихідна шорсткість) на якість накатаних зубців. Ця залежність представлена на рис. 6.26.

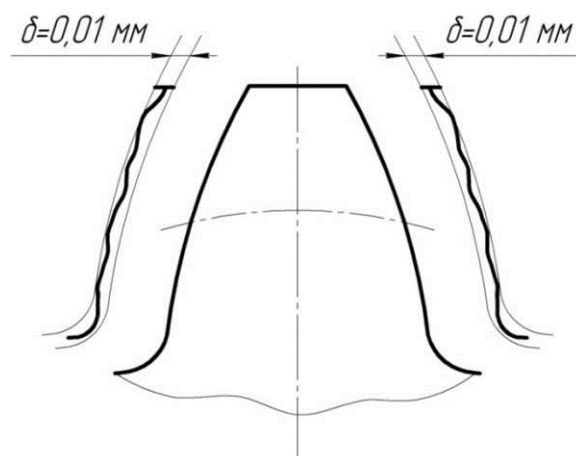


Рис. 6.25. Характер спотворення профілю зуба, накатаного гіперболоїдним інструментом

Для експерименту було обрано гіперболоїдний накатник з кількістю зубців $z_2=17$, з діаметром ділильного кола $d_d=72,15\text{ мм}$. За допомогою цього інструменту було накатано 8 циліндричних зубчастих коліс з кількістю зубців $z_1=100$, виготовлених зі сталі 45. Графіки показали, що незначне збільшення зусилля накатування дозволяє накатувати зубчасті колеса, зуб яких має однакову шорсткість, що дозволяє в широких межах змінювати якість попередньо нарізаних зубців.

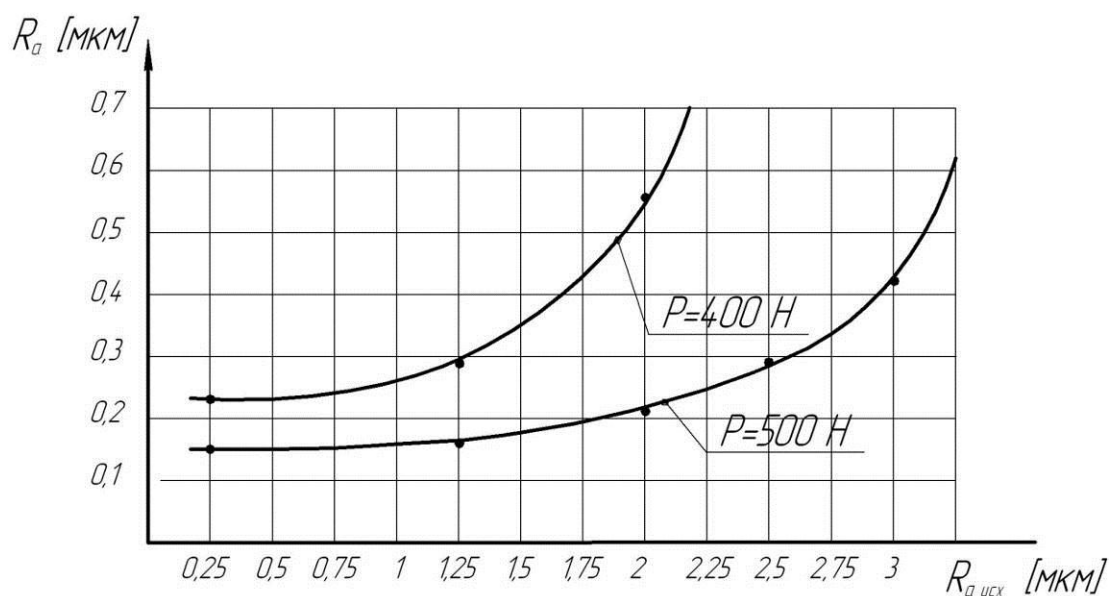


Рис. 6.26. Вплив вихідної шорсткості нарізаного зуба на шорсткість накатаних зубців

Далі в роботі було досліджено вплив зусилля накатування на шорсткість накатаного зуба, який наведене на рис. 6.27.

Для накатування зубчастих коліс були обрані 24 зубчастих колеса с $m_n=1,5\text{мм}$ і кількістю зубців $z_1=100$. Накатка проводилася за допомогою 3-х накатників з кількістю зубців $z_2=17$, діаметри ділильних кіл яких в горловому перетині становили відповідно $d_d=72,15$; $54,42$; $37,5\text{мм}$. Експериментальні дослідження дали можливість визначення коректного вибору геометрії накатного інструменту в залежності від необхідної шорсткості накатаного зуба.

Вдалося спроектувати і виготовити на універсальному обладнанні з ЧПК гіперболоїдні накатники, у яких основна і твірна інструментальні поверхні збігаються.

Дослідження профілю накатаних зубців показало незначне відхилення отриманої в результаті накатки евольвенти від теоретичної. Крім того, важливим результатом дослідження є те, що на накатаному зубі відсутня хвиля пластично деформованого металу, а також виступ і западина в районі ділильного кола.

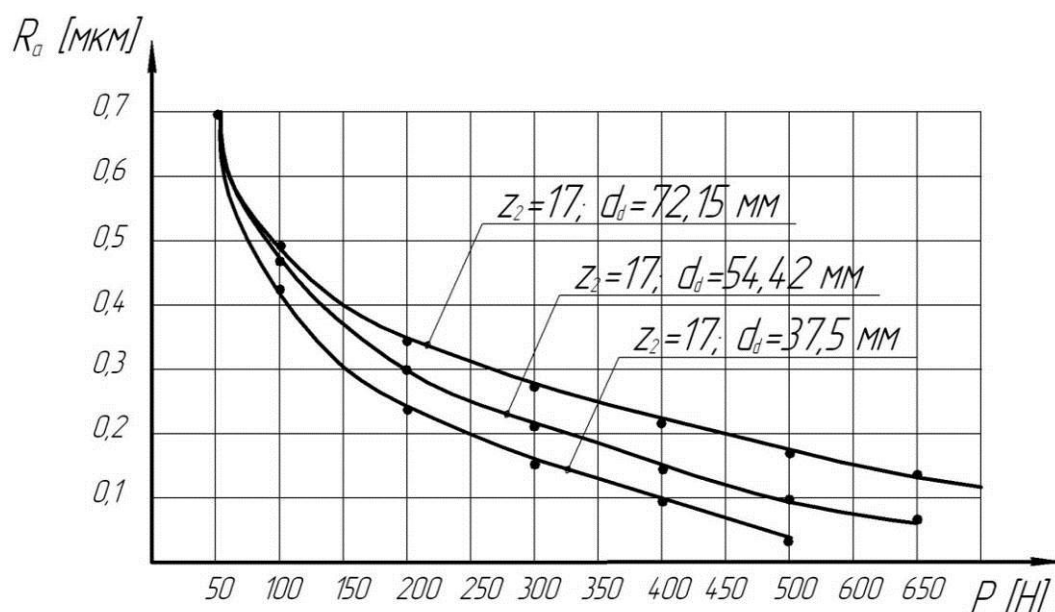


Рис. 6.27. Вплив зусилля накатування на шорсткість обробленого зуба

6.2. Практична реалізація на промислових підприємствах України

Практичні результати дисертаційної роботи впроваджені у виробничий процес ДП «ЛОРТА» місто Львів в такому виді:

1. Програмне забезпечення для синтезу та аналізу складних поверхонь, застосування якого для деталей спеціального призначення дозволило аналізувати їх зношування та вирішувати задачі формоутворення. Результатом використання даного програмного забезпечення стало скорочення витрат часу на технологічне проектування на 25%–30%.

2. Методика інтерактивного синтезу та програмне забезпечення процесу формоутворення складних поверхонь з наступним візуальним аналізом їх геометричних та кінематичних показників, які характеризують властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в потенційних умовах його експлуатації.

Використання зазначених результатів дозволяє: підвищити якість технологічного проектування та ефективність роботи відділу головного технолога; підвищити продуктивність праці при операціях механічного оброблення в середньому на 12%.

Матеріали та результати дисертаційної роботи використані в діяльності конструкторсько-технологічного відділу ТОВ «НДІ «Редуктор» місто Київ шляхом впровадження:

1. Комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125, що призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн.

2. Удосконалення зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для обробки зубчастих коліс дозволило знизити витрати на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн.

Сумарний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи склав 236 тис. грн.

6.3. Практична реалізація в навчальному процесі

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за спеціальністю «133 – галузеве машинобудування», а саме, створені нові розділи для дисципліни «Теорія формоутворення спеціальних поверхонь», розроблено новий розділ «Комп'ютерна інтеграція систем та процесів формоутворення складних поверхонь», для дисципліни «Інструментальне та технологічне забезпечення процесів формоутворення» розроблено новий розділ «Підвищення ефективності процесу формоутворення на основі синтезу теорії поверхонь та теорії формоутворення».

Матеріали та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю «131 – прикладна механіка» і використовуються при викладанні дисципліни «Технологія обробки типових деталей і складання машин», зокрема при проведенні практичних занять використовуються методика та програмне забезпечення інтерактивного синтезу складних поверхонь.

Висновки до розділу 6

1. За допомогою розробленого в роботі математичного, методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення були спроектовані і виготовлені шевронні, гвинтові та гіперболоїдні зубчасті колеса, а також, спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для механічної обробки циліндричних зубчастих коліс.

2. Нове програмне забезпечення для аналізу і синтезу функціональних поверхонь, використане для проектування деталей спеціального призначення,

дозволило скоротити витрати нормо–годин на технологічне проектування на 25-30%, підвищити якість технологічного проектування та ефективність роботи технологів, підвищити продуктивність роботи при механічному обробленні деталей зі складною функціональною поверхнею в середньому на 12%.

3. Впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125 призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн.

4. Удосконалення зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс дозволило знизити витрати на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн.

Сумарний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи склав 236 тис. грн.

На способи формоутворення зубчастих коліс, зубчасті передачі та зуборізний інструмент отримані патенти [199], [200], [201], [205] (додаток Г).

Матеріали розділу опубліковані в наступних роботах: [28], [44], [49], [52], [53], [54], [57], [58], [59].

Акти впровадження результатів роботи на промислових підприємствах і в навчальному процесі наведені в додатку Д.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті комплексних досліджень процесу формоутворення зубчастих коліс в частині інтерактивного керування формою поверхні, параметризації функції формоутворення для різних кінематичних схем, аналізу геометричних та кінематичних показників як процесу формоутворення, так і взаємодії зубців зубчастих коліс, реалізована комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри системи формоутворення, її елементів, якісних показників, що забезпечує можливість розробки автоматизованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс та їх інтеграцію в системи автоматизованого проектування, виробництва, аналізу та контролю.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Аналіз стану та перспектив розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс при механічній обробці показав, що на сучасному етапі розвитку комп'ютерних технологій на основі синтезу теорії формоутворення, теорії зубчастих зачеплень і теорії поверхонь існують потреби і умови створення вискоєфективних систем формоутворення зубчастих коліс, що дозволяють значно прискорити процес проектування зубчастих коліс, знизити матеріальні та часові витрати за умови забезпечення якості.

2. Реалізація на єдиній математичній базі та уніфікованих керуючих параметрах комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс дозволила автоматизувати процес формоутворення та інтерактивне керування всіма елементами системи формоутворення з одночасним аналізом його ефективності.

3. Математичний опис поверхні, приведений до універсального виду на базі уніфікованих керуючих параметрів, забезпечує апроксимацію точкового подання цих поверхонь сплайновими поверхнями і створює основу для

використання єдиних методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення автоматизації процесу формоутворення, що в сукупності забезпечило як підвищення точності опису та виготовлення функціональних поверхонь зубчастих коліс і зубообробного інструменту, так і підвищення ефективності технології виготовлення та контролю.

4. Інтерактивне керування формоутворенням зубчастих коліс в залежності від поставлених завдань можна здійснювати двома способами: шляхом перетворення простору разом з вихідною кривою, що описує профіль або функціональну поверхню; шляхом зміни внутрішніх параметрів, що визначають профіль зубчастих коліс.

5. Для узагальнення математичного опису функції формоутворення доцільно використовувати матричне подання, яке дозволяє переходити від одного класу схеми формоутворення до іншого в інтерактивному режимі.

6. Отримані математичні залежності функції формоутворення стосовно часткових випадків кінематичних схем формоутворення 3-го класу, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій, використання яких створило основу удосконалення інструментів типу «однопорожнинний гіперболоїд».

7. Використання геометричних та кінематичних показників, які функціонально залежні від єдиних уніфікованих керуючих параметрів для оцінювання процесу формоутворення та якісних параметрів зубчастих коліс дозволило оцінювати процес безпосередньо під час інтерактивного аналізу формоутворення зубчастих коліс.

8. Використання єдиних уніфікованих параметрів системи формоутворення дозволяє інтегрувати систему формоутворення, що включає попередню оцінку геометрії та кінематики процесу формоутворення, в автоматизовані системи проектування, виробництва, аналізу та контролю.

9. Методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення для інтерактивного керування формоутворенням поверхонь, уніфікації керуючих параметрів, визначення контактних точок, синтезу і оптимізації складних

поверхонь зубчастих коліс і зубооброблювальних інструментів, засновані на отриманих в роботі математичних залежностях, дозволили розробити комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс з можливістю автоматизованого проектування та інтерактивного керування.

10. Нове програмне забезпечення для аналізу та синтезу складних поверхонь, використане для проектування деталей спеціального призначення, дозволило скоротити витрати часу на технологічне проектування на 25-30%, кількість помилок на етапі технологічного проектування, підвищити ефективність роботи технологів і продуктивність механічного оброблення деталей зі складною поверхнею в середньому на 12%.

11. Використання комп'ютерно-інтегрованої системи в ТОВ НДІ «Редуктор» для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125 призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн., а удосконаленого зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс дозволило знизити витрати на інструмент на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн. Сумарний економічний ефект від впровадження склав 236 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агеев А.И. Оптимизация геометрических параметров зубчатых передач по комплексу критериев работоспособности / А.И. Агеев, Г.А.Журавлев, М.Е.Хомич, Э.М.Чилевич // Повышение надежности и снижение металлоемкости зубчатых передач и редукторов общего машиностроительного применения. – Харьков, 1983. – С.83 – 84.
2. Агеев А.И. Опыт проектирования тяжело нагруженных зубчатых передач с оптимальной геометрией зуба / А.И. Агеев, Г.А. Журавлев, М.Е. Хомич, Э.М. Чилевич // Совершенствование конструкции и технологии зубообработки передач зацеплением. – Ижевск, 1984. – С.17 – 18.
3. Альберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Альберг, Э. Нильсон. – М.: Мир, 1972. – 320 с.
4. Андриенко С.В. Численное моделирование профиля зуба звездочки цепной передачи зуба / С.В. Андриенко, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – № 1. – С. 11 – 17.
5. Аникин Ю.В. Синусоидальное зацепление: основы геометро-кинематической теории / Ю.В. Аникин. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1975. – 63 с.
6. Антонов О.А. Направления в конструировании зуборезного инструмента / О.А.Антонов // Вестник машиностроения. – 1990. – №8. – С. 36–38.
7. Антонюк В.Е. Модификация зубчатых зацеплений как средство повышения показателей качества и нагрузочной способности зубчатых передач / В.Е. Антонюк, Б.С. Воронцов, В.Е. Старжинский, В.А. Белый, В.В. Супин // Теория и практика зубчатых передач. – Ижевск: ИжГТУ, 2014. – С. 285– 301.
8. Бабак В.Ф. Модели и методы конструирования интеллектуальных САПР ТП механообработки / В.Ф. Бабак // Машиностроит. пр-во. Сер.

Автоматизир. системы проектирования и управления. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып.5. – 56 с.

9. Бабичев Д.Т. Вопросы исследования геометрии и кинематики пространственных зацеплений: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Д.Т. Бабичев. – Новочеркасск, 1971. – 22 с.

10. Бабичев Д.Т. Новый кинематический метод исследования формообразования поверхностей способом огибания / Д.Т.Бабичев // Новые материалы и технологии в машиностроении: междунар. науч.-техн. конф., 31 окт. – 3 нояб. 2000 г.: тезисы докл. – Тюмень, 2000. – С.31–33.

11. Бабичев Д.Т. Общий случай образования поверхностей кинематическим методом / Д.Т. Бабичев // V науч.-техн. конф. молодых уч. и спец. Тюмени, 14–16 мая 1970 г.: тезисы докл. – Тюмень, 1971. – С.465–479.

12. Бабичев Д.Т. Развитие теории зацеплений и формообразования поверхностей на основе новых геометро-кинематических представлений: дисс. ... доктора техн. наук / Д.Т. Бабичев. – Тюмень, 2005. – 421 с.

13. Балтаджи С.А. Оптимизационный синтез неортогональных червячных передач. / С.А. Балтаджи // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1982. – №6. – С.40–43.

14. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, Л.С. Кельзон. – М.: Машиностроение, 1971. – 471 с.

15. Белькович А. PowerSHAPEPro: новые возможности реверсивного инжиниринга / А. Белькович, В. Власов, К. Евченко // САПР и графика. – 2009. – №1. – С. 16 -22.

16. Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа / А.Ф. Бермант, И.Г. Аранович. – М.: Наука, 1971. – 736 с.

17. Бляшке В. Введение в геометрию тканей. / В.Бляшке // Пер. с нем. – М.: Физмат, 1959. – 144 с.

18. Боголюбский К.А. Геометрическая теория пространственных передач, составленных из зубчатых колес, изготовленных эвольвентным

долбляком: дис. ... доктора техн. наук: 01.02.02 / К.А. Боголюбский. – М., 1951. – 293 с.

19. Болотовский И.А. К вопросу о рациональном выборе коэффициентов смещения зубчатых передач / И.А. Болотовский // Тр. Уфимского авиационного института. – Уфа, 1957. – Вып. 3. – С. 75-102.

20. Болотовский И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / И.А. Болотовский, В.И. Безруков, О.Ф. Васильева и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

21. Болотовская Т.П. Справочник по корригированию зубчатых колес / Т.П. Болотовская, И.А. Болотовский, Г.С. Бочаров и др. – М.: Машгиз, 1962. – 215 с.

22. Болотовская Т.П. Справочник по корригированию зубчатых колес / Т.П. Болотовская, И.А. Болотовский, Г.С. Бочаров и др. // Ч.2: Зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления, составленные из колес, нарезанных долбьями. – М.: Машиностроение, 1967. – 576 с.

23. Борисов В.Д. О выборе годных участков начальных поверхностей в гиперболоидных передачах с дуговым линейным контактом из условия отсутствия пересечения поверхностей зубьев / В.Д. Борисов // Изв. вузов «Машиностроение». – 1974. – №2. – С. 16-21.

24. Бочарова И.А. Алгоритм и программа для интерактивного синтеза цилиндрических зубчатых передач / И.А.Бочарова // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2007. – Вип.16. – С. 133–140.

25. Бочарова І.А. Геометрична модель формоутворення зубців і управління кінематичними показниками циліндричних передач: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.01 / І.А. Бочарова. – Донецьк, 2008. – 18 с.

26. Бочарова И.А. Зуботочение цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип.

30. – С.32 – 36.

27. Бочарова І.А. Модифікація твірної поверхні з використанням кривої Безьє третього порядку / І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 4, т.30.– С. 116 – 120.

28. Бочарова И.А. Накатка зубьев цилиндрических колес методом ПДУ / И.А. Бочарова, О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Вестник двигателестроения: научно– технич. журнал. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – №2. – С. 102 – 105.

29. Бочарова И.А. Особенности формообразования зубчатых колес для гиперболоидных передач / И.А. Бочарова, А.В. Витренко, Б.С. Воронцов// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 50 – 53.

30. Бочарова И.А. Твердотельное компьютерное моделирование зубчатых колес с модифицированными зубьями / И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский // Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості: II міжнар. наук.–техніч. конф., 17 – 21 листоп. 2003 р.: тези доп. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – С.16-17.

31. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещивающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А.Кириченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2005. – №7 (89) – С. 34 – 36.

32. Браун П.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / П.С. Браун, И.А. Кириченко, В.А. Витренко // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. – Київ: НТУУ КПИ, 1998. – Том 2. – С.65-69.

33. Бройдо Б.Е. Метод профилирования зубьев цилиндрических зубчатых передач по заданному параметру износа: автореф. дис. на

соискание уч. степени канд. техн. наук / Б.Е. Бройдо. – Киев, 1951. – 21 с.

34. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

35. Будыка Ю.Н. Некоторые вопросы теории, расчета и технологии оптимальных по износу зубцов открытых зубчатых передач: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Ю.Н. Будыка. – Л., 1951. – 19 с.

36. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики: Учеб. пособ.: в 2 т. / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – М.: Наука, 1998. – . – Т.1. – 1998. – 234 с.

37. Быховский Л.Б. Геометрия конволютных винтовых поверхностей / Л.Б. Быховский // Станки и инструмент. – 1968. – №2. – С. 25-28.

38. Васильев В.М. Кривизна взаимооггибаемых поверхностей зубьев / В.М. Васильев, И.И. Дусев, Ю.С. Васильева // Труды Новочеркасского политехнического института. – Новочеркасск, 1969. – Т. 187. – С.130-136.

39. Васильев В.М. Новый метод для определения кривизны взаимооггибаемых поверхностей / В.М. Васильев // Труды семинара по теории машин и механизмов АН СССР. - 1964. – С. 103-104.

40. Васильев В.М. Определение радиусов кривизны взаимооггибаемых поверхностей / В.М. Васильев, И.И. Дусев. – Новочеркасск: НПИ, 1963. – Т. 149. – С. 53–70.

41. Васильев В.М. Относительное скольжение зубьев в пространственных передачах / В.М. Васильев, И.И. Дусев // Теория передач в машинах. – М.: Машгиз, 1970. – С. 27-36.

42. Винь Доан Дык. Технология изготовления цилиндрических зубчатых колес для всех отраслей машиностроения / Доан Дык Винь, И.А. Кириченко // Вісник Харківського державного університету сільського господар. Сер. Підвищення надійності відновлюємих машин. – 2000. –Вип. 4. – С. 166-169.

43. Витренко А.Н. Исследование геометрии и кинематики цилиндро-гиперболоидных передач: дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук:

05.02.02 / А.Н. Витренко. – Ворошиловград, 1975. – 214 с.

44. Витренко В.А. Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, И.А. Бочарова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №41. – С. 27 – 31.

45. Витренко В.А. Гиперболоидная зубчатая передача с линейным контактом / В.А. Витренко, И.А. Кириченко, В.В. Белозерова, А.В. Витренко // Междун. сб. научн. трудов. “Прогрессивные технологии и системы машиностроения”. – Донецк. – 2003. – С. 52-55.

46. Вітренко В.О. Гіперболоїдні інструменти для обробки і обладнання циліндричних прямозубих зубчатих коліс: автореф. дис... доктора техн. наук: 05.03.01 / Вітренко Володимир Олексійович. – К., 1995. - 32 с.

47. Витренко В.А. Гиперболоидный инструмент для нарезания зубьев / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, А.В. Лейба, Д.А. Чаплинский // Машиностроение и техносфера XXI века: XV междунар. науч.-техн. конф., 15-20 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2008. – Т.1. – С. 184 – 188.

48. Витренко В.А. Изготовление и отделка цилиндрических зубчатых колес гиперболоидными инструментами / В.А. Витренко. – Луганск: ВНУ, 1994. – 112 с.

49. Витренко В.А. Особенности изготовления зуборезных долбяков / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. - Вып.117. – С. 27 – 31.

50. Витренко В.А. Поверхностное моделирование гиперболоидных инструментов в системе PowerSHAPE / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ

«ХП», 2011. – №29. – С. 30 – 35.

51. Вітренко В.О. Профілювання зубооброблювального обкатного інструменту / В.О. Вітренко, Б.С. Воронцов, І.А.Бочарова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Львівська політехніка, 2014. – Вип. 772. – С.56 – 59.

52. Витренко В.А. Разработка технологии изготовления винтовых зубчатых колес на универсальном оборудовании / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Н. Семянистая // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вип.139. – С. 33 – 37.

53. Витренко В.А. Технологические особенности изготовления гиперболоидного инструмента для финишной обработки зубчатых колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, А.В. Лейба, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 32. – С.64 – 68.

54. Витренко В.А. Технологические особенности проектирования и изготовления гиперболоидных колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 34. – С.47 – 53.

55. Витренко В.А. Формообразование зубьев колес гиперболоидных передач/ В.А. Витренко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 4 червня 2010 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С.23.

56. Витренко В.А. Формообразование зубьев многозаходных зубообрабатывающих инструментов / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова, В.В. Черновол // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Оптимізація виробничих процесів і технічний

контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Львівська політехніка, 2011. – Вип. 713. – С.3 – 6.

57. Витренко О.С. Вопросы формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №36. – С. 25 – 28.

58. Витренко О.С. Исследование процесса формообразования гиперболоидных зубчатых колес при помощи инструментального зубчатого колеса / О.С. Витренко, И.А. Кириченко, Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С. 188 – 194.

59. Витренко О.С. Накатка зубьев зубчатых колес при помощи гиперболоидных накатников / О.С. Витренко, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 203 – 208.

60. Вітренко О.С. Підвищення точності зміцнювальної накатки зубців за рахунок розробки принципово нової геометрії накатного інструмента: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.03.01 / О.С. Вітренко. – Донецьк, 2010. – 17 с.

61. Воронцов Б.С. Автоматизация процессов формообразования при механической обработке сложных поверхностей / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XV міжнар. наук.–техн. конф., 30 травня – 1 червня 2017 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С.17.

62. Воронцов Б.С. Автоматизированная система синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С.133 – 138.

63. Воронцов Б. С. Анализ условий контактирования гиперболоидного инструмента и изготавливаемого колеса в системе PowerSHEPE / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С. 291 – 298.

64. Воронцов Б.С. Взаємообвідні поверхні циліндричних передач з круговою лінією зубців / Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип. 4. – Т. 33. – С. 130 – 135.

65. Воронцов Б.С. Визуальный динамический синтез сопряженных поверхностей / Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2006. – Вип.15. – С. 107– 113.

66. Воронцов Б.С. Гиперболоидные инструменты для изготовления цилиндрических колес с произвольным профилем зуба / Б.С.Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – Вип. 19. – С.76 – 81.

67. Воронцов Б.С. Гиперболоидные передачи с управляемым исходным контуром производящего колеса / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006 – №22. – С. 56 – 60.

68. Воронцов Б.С. Допоміжні ділянки вихідного контуру зубчастих коліс / Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.13. – С. 179 – 185.

69. Воронцов Б.С. Единая информационная модель конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2008. – С.139 – 142.

70. Воронцов Б.С. Интерактивное управление синтезом зубчатых

передач / Б.С. Воронцов // Вестник национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. трудов. Тематический выпуск «Проблемы механического привода». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – №40. – С. 182 – 187.

71. Воронцов Б.С. Использование программного комплекса Power Solution для изготовления сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VII міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2009 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – С.17 – 18.

72. Воронцов Б.С. Использование теории сплайнов при поверхностном моделировании гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов, М.А. Кашура, В.В. Черноволов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX міжнар. наук.-техн. конф., 31 травня – 3 червня 2011 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С.33 – 34.

73. Воронцов Б.С. Использование унифицированных параметров при автоматизации проектирования зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Львівська політехніка, 2012. – Вип. 746. – С.180 – 185.

74. Воронцов Б.С. Исследование схем формообразования накатного инструмента / Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, М.Н. Кузнецова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XI міжнар. наук.-техн. конф., 4 – 6 червня 2013 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С.34.

75. Воронцов Б. С. Компьютерная интеграция систем и процессов формообразования при механической обработке / Б.С. Воронцов, В.А. Пасечник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 17 – 23.

76. Воронцов Б.С. Компьютерное управление геометрией зубьев зубчатых колес и зуборезных инструментов / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну: міжвід. наук.–техн. зб. – К.: ДОП КНУТД, 2005. – С.184 – 189.

77. Воронцов Б.С. Компьютерное формообразование твердотельных моделей гиперboloидных инструментов / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С. 298 – 302.

78. Воронцов Б.С. Концептуальные вопросы интеграции конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2003. – №11(69). - С.194 – 198.

79. Воронцов Б.С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2010. – №27. – С. 49 – 54.

80. Воронцов Б.С. Моделирование гиперboloидных инструментов с использованием CAD – систем / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, И.А. Бочарова, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 318 – 323.

81. Воронцов Б.С. Наукові основи технології реінжинірингу зубчастих зацеплень / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Прогресивні технології в машинобудуванні: VI міжнар. наук.-техн. конф., 6 – 10 лют. 2017 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – С. 28 – 30.

82. Воронцов Б.С. Особенности твердотельного компьютерного моделирования гиперboloидных передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний

випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №21. – С. 249 – 254.

83. Воронцов Б.С. Повышение эффективности единичного производства сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С. 227 – 231.

84. Воронцов Б.С. Применение CAD/CAM/CAE/PDM - систем для моделирования тяговых передач / Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: VIII междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1998. – С.57 – 58.

85. Воронцов Б.С. Проектирование зуборезного инструмента при помощи системы Pro/ENGINEER / Б.С. Воронцов, В.И. Быковский // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения" [Спец.выпуск]: V междунар. науч.-техн. конф. "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века", 8-11 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонГТУ, 1998. - Вып.6. – Т.1. – С. 166 – 169.

86. Воронцов Б.С. Производящая поверхность реечного типа с изменяемой продольной формой зуба / Б.С. Воронцов, Т.Н. Чаплинская // Системні технології: Регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 2 (43). – С.53 – 56.

87. Воронцов Б.С. Профилирование зубьев производящего колеса на основе геометрических преобразований / Б.С.Воронцов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – №3 (97). – С. 31 – 36.

88. Воронцов Б.С. САПР зубчатых передач / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VI міжнар. науч.-техн. конф., 2 – 5 червня 2008 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С.20 – 21.

89. Воронцов Б.С. Синтез и изготовление сложнопрофильных

зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №20. – С. 54 – 59.

90. Воронцов Б.С. Совершенствование кинематических схем формообразования зубообрабатывающего инструмента / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вып.129. – С. 40 – 45.

91. Воронцов Б.С. Совершенствование математических моделей задания и теоретического формообразования зубчатых передач с использованием глобальной сплайн-интерполяции / Б.С. Воронцов, А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, Т. Е. Третьяк // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №25 (1247). – С. 19 – 24.

92. Воронцов Б.С. Современные проблемы оптимизации передач со скрещающимися осями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, А.Б. Воронцов // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Серія: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып.107. – С. 41 – 44.

93. Воронцов Б.С. Создание трехмерных твердотельных моделей тяжело нагруженных колес с бочкообразными зубьями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.– Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2003. – №9 (67). – С.231 – 235.

94. Воронцов Б.С. Унификация геометрии рабочих поверхностей зубьев при синтезе передач зацеплением / Б.С.Воронцов, И.А.Бочарова, Д.А.Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №29. – С. 24 – 28.

95. Воронцов Б.С. Формообразование зубчатых колес с линейным характером касания зубьев / Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Машинобудування – очима молодих: міжнар. наук.-техн. конф., 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: тези доп. – Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С.10.
96. Воронцов Б.С. Формоутворення гіперболоїдних фрез / Б.С. Воронцов, В.О. Вітренко, С.Г. Кириченко // Прогресивні технології в машинобудуванні: всеукр. наук.-техн. конф., 10 – 15 лют. 2014 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – С. 19.
97. Выгодский М.Я. Дифференциальная геометрия / М.Я. Выгодский. – М.: Машгиз, 1949. – 659 с.
98. Высококоскоростное фрезерование [Электронный ресурс] / А.Ю. Воронин // Siemens. – Режим доступа: http://cccp3d.ru/index.php?app=core&module=attach§ion=attach&attach_id=32098.
99. Гавриленко В.А. Геометрическая теория эвольвентных зубчатых передач / В.А. Гавриленко. – М.: Машгиз, 1949. – 404 с.
100. Гавриленко В.А. Задачи синтеза зацеплений и передач / В.А. Гавриленко // VII Всес. совещ. по основным проблемам теории машин и механизмов. – Тбилиси, 1974. – С. 54 – 58.
101. Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении / В.А. Гавриленко. – М.: Машгиз, 1962. – 532 с.
102. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. / В.А. Гавриленко. – М.: Машиностроение, 1969. – 431 с.
103. Гавриленко В.А. Цилиндрическая эвольвентная зубчатая передача / В.А. Гавриленко. – М.: Машгиз, 1956. – 296 с.
104. Георгиев А.К. Определение профиля витков червяка гипоидно-червячной передачи / А.К. Георгиев. – Ижевск: Удмуртия, 1964. – С. 15-23.
105. Гинзбург Е. Г. К вопросу о кривизне сопряженных поверхностей / Е.Г. Гинзбург // Труды Ленинградского механического ин-та. – 1962. – №

23. – С.23 – 25.

106. Глоба Л.С. Интеллектуальні принципи формування технологічного маршруту обробки деталей / Л.С. Глоба // Праці Міжнародної наук. техн. конференції „Прогресивна техніка і технологія машинобудування і зварювального виробництва". – Київ, НТТУ „КПІ", 1999. - С. 290 – 300.

107. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. / Н.Н. Голованов – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002. – 472 с.

108. Голубенко А.Л. Геометрия и кинематика цилиндрико-гиперболоидных зубчатых передач / А.Л. Голубенко, И.А. Кириченко, В.А. Витренко, О.Л. Игнатъев, А.В. Витренко // Вісник Сх. нац. ун-ту. – Луганськ: СХУ, 2002. – № 3 (46) .– С. 26 – 28.

109. Голубенко А.Л. Синтез неэвольвентных зуборезных инструментов для обработки цилиндрических эвольвентных колес для транспортных машин / А.Л. Голубенко, И.А. Кириченко // Вісник Східноукраїнського державного університ. Сер. транспорт. – 2000. – №7 (29). – С.169 – 172.

110. Гохман Х.И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа / Х.И. Гохман. – Одесса, 1886. – 198 с.

111. Грабченко А. И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок, Л.И. Пупань, В.А. Фадеев.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

112. Грабченко А.И. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник для высш. учебн. заведений / А.И. Грабченко, В.А.Залого, Ю.Н. Внуков и др.; под общ. ред. А.И. Грабченко, В.А.Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.

113. Грибанова Ю.В. Многокритериальная оптимизация зубчатых цилиндрических передач Новикова: дис... канд. техн. наук: 05.02.02 / Ю.В. Грибанова – Луганск, 2000. – 189 с.

114. Грибанов В.М. Задача сравнительного многокритериального

анализа зубчатых передач с различными исходными контурами / Грибанов В.М., Малый Д.В., Клипаков Н.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы механічного приводу. – Вестник НТУ "ХПИ", 2005. – №40 – С. 26 – 31.

115. Грибанов В. М. Теоретические основы точности и разработка допусков зубчатых передач с зацеплением Новикова: дисс. ... доктора техн. наук / В. М. Грибанов. – Луганск, 1990. – 410 с.

116. Грицай І.Є. Застосування дискових фрез із рухомою віссю обертання для покращення техніко-економічних показників виготовлення циліндричних зубчастих коліс / І.Є. Грицай, Я.М. Литвиняк, А.М. Кук // Інструменти та інструментальне виробництво. – Львів: ЛВЦНТЕІ, 2007. – С. 31–32.

117. Грицай І.Є. Зубчатые эвольвентные передачи: достоинства, недостатки, традиции / І.Є. Грицай, Е.М. Благут // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия "Металлообработка". – 2005. – № 2. – С. 36 – 40.

118. Грицай І.Є. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення / І.Є. Грицай, Е.М. Благут, В.З. Яворський // УІЦ «Наука. Техника. Технологія». – К., 2004. – С. 47 – 50.

119. Грицай І.Є. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення / І.Є. Грицай, Я.М. Литвиняк // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №19. – С. 43 – 52.

120. Грицай І.Є. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання / І.Є. Грицай, В.І. Вільшанецький // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №28. – С. 44 – 52.

121. Громан М.Б. Подбор коррекции зубчатых передач / М.Б. Громан

// Вестник машиностроения. – 1955. – № 2. – С. 21 – 26.

122. Давыдов Я.С. Неэвольвентное зацепление / Я.С. Давыдов. – М.: Машгиз, 1950. – 189 с.

123. Давыдов Я.С. Об одном обобщении метода Оливье для образования сопряженных поверхностей в зубчатых передачах / Я.С. Давыдов // Сб. «Теория передач в машинах». – М.: Машгиз, 1963. – С. 19 – 25.

124. Данильченко Ю.М. Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес / Ю.М. Данильченко, А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. – С.484 – 489.

125. Доброскок В.Л. Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования ImetricIsan / В.Л. Доброскок, С.И. Чернышов, Я.Н. Гаращенко, Д.П. Сидорчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2010 – Вип. 4. – С. 123 – 135.

126. Дорошенко Ю.О. Застосування політканинних перетворень у задачах синтезу зубчастих передач / Ю.О. Дорошенко, Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі: міжнар. наук.-практичної конф., 27 – 29 травня 2004 р.: тези доп. – Ізмаїл, 2004. – С. 112 – 113.

127. Дорошенко Ю.О. Політканинні перетворення у деформативному конструюванні геометричних об'єктів. – К.: Педагогічна думка, 2001. – 390с.

128. Дорошенко Ю.О. Політканинні перетворення у конструюванні профілю вихідного контуру зуборізного інструменту / Ю.О. Дорошенко, І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.11. – С. 68 – 74.

129. Дружинский И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках / И.А. Дружинский. – М.: Машиностроение, 1965. – 600 с.

130. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 263 с.
131. Дусев И.И. Аналитическая теория пространственных зацеплений и ее применение к исследованию гипоидных передач. / И.И. Дусев, В.М. Васильев. – Новочеркасск: Изд НПИ, 1968. – 148 с.
132. Дусев И.И. Выбор критериев качества пространственных зацеплений с локализованным контактом / И.И.Дусев // Вопросы проектирования и исследования механизмов машин и автоматов. – Новочеркасск, 1978. – С. 3 – 13.
133. Дусев И.И. Кривизна нормальных сечений сопряженных поверхностей зубьев зубчатых зацеплений / И.И.Дусев // Известия ВУЗов, Машиностроение. – 1964. – №3. – С. 18 – 25.
134. Дусев И.И. Новый метод исследования в теории зубчатых зацеплений / И.И.Дусев // Теория передач в машинах. – М.: Наука, 1971. – С. 75 – 83.
135. Дусев И.И. Определение кривизны взаимоогibaемых поверхностей зубьев / И.И.Дусев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1968. – №5. – С. 23 – 27.
136. Дусев И.И. Подрезание зубчатых колес при нарезании / И.И.Дусев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1965. – №6. – С. 12 – 20.
137. Дусев И.И. Связь между геометрическими и кинематическими параметрами высшей кинематической пары / И.И.Дусев // Изв. Северо-Кавказкого научного центра высшей школы. – 1973. – №3. – С. 28 – 32.
138. Дусев И.И. Удельное скольжение взаимоогibaемых поверхностей зубьев пространственных зацеплений / И.И.Дусев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1968. – №4. – С. 15 – 18.
139. Ерихов М.Л. Интерференция (подрезание) в передачах, образованных по методу огibaния с двумя параметрами / М.Л. Ерихов // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1966. – №7. – С. 37 – 44.

140. Ерихов М.Л. К вопросу о синтезе зацеплений с точечным касанием / М.Л.Ерихов // Теория передач в машинах. – М.: Машиностроение, 1966. – С. 28 -34.

141. Ерихов М.Л. Метод последовательного огибания / М.Л.Ерихов // Механика машин. – 1972. – Вып. 31-32. – С. 12 – 20.

142. Ерихов М.Л. Некоторые методы образования сопряженных поверхностей с двухточечным контактом в зацеплениях с арочными зубьями / М.Л. Ерихов, В.Н. Сызранцев // Труды международной конференции «Теория и практика зубчатых передач». – Ижевск, 1994. – С. 241 – 246.

143. Ерихов М.Л. Определение главных кривизн и главных направлений огибающей двухпараметрического семейства поверхностей. / М.Л.Ерихов // Изв. ВУЗов, машиностроение. – 1966. – №9. – С. 19 – 25.

144. Ерихов М.Л. Определение нормальных кривизн поверхностей с точечным касанием / М.Л. Ерихов // Изв. ВУЗов, машиностроение. –1966. – №8. – С. 12 – 18.

145. Жермен-Лакур П. Математика и САПР: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с франц./ П. Жермен-Лакур, П. Л. Жорж, Ф. Пистр, П. Безье. — М.: Мир, 1989. — 264с.

146. Журавлев Г.А. О влиянии формы зубцов на их контактную прочность в полюсе зацепления / Г.А.Журавлев // Труды 3-го Всесоюзного Симпозиума «Теория и геометрия пространственных зацеплений». - Курган, 1979. – С. 38 – 41.

147. Заблонский К.И. Анализ факторов, влияющих на нагрузку в зацеплении, и их отражение в расчетах зубчатых передач / К.И. Заблонский // Vortragsband Tagung "Zahnradgetriebe Dresden 1989". – Dresden: TUD, 1989. – S.44-59.

148. Зарифьян О.П. Оптимизация геометрии цилиндрических передач методом ЛП-поиска / О.П. Зарифьян, И.И.Дусев // Деп. в НИИМаш. – Новочеркасск, 1983. – №193-83. – 41 с.

149. Зарифьян О.П. Многокритериальный синтез цилиндрических

зубчатых передач с оптимальными параметрами методом ЛП- поиска: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / О.П. Зарифьян – Новочеркасск, 1983. – 18 с.

150. Захаров С.А. Синтез оптимального по условиям заедания внешнего эвольвентного зацепления / С.А. Захаров, В.Н.Красин, В.В.Логинов // Машиноведение. – 1982. – №3. – С.91 – 93.

151. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.

152. Калашников С.Н. Производство зубчатых колес: справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др.; под ред. Б.А. Тайца. – [3-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

153. Капустин Н.М. Диалоговое проектирование технологических процессов / Н.М. Капустин, В.В. Павлов, Л.А. Козлов и др. – М.:Машиностроение, 1983. – 275 с.

154. Кириченко И.А. Зубохонингование цилиндрических колес для транспортных машин / И.А. Кириченко // Технічні науки (промисловий транспорт, машинобудування, автоматизація, безпека життєдіяльності: Зб. наук. пр. – Луганськ.: Вид-во СУДУ, 2000. – С. 113 – 115.

155. Кириченко И.А. Инструменты для обработки цилиндрических зубчатых колес / И.А. Кириченко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-цтво СУДУ, 2000. – С. 142 – 145.

156. Кириченко И.А. Обработка и отделка зубьев цилиндрических колес лезвийными и абразивными инструментами, полученными в пространственном станочном зацеплении / И.А. Кириченко // IV Межд. симпоз."Теория реальных передач зацеплением": тезисы докл. – Курган: КГУ, 1997. – С. 111 – 114.

157. Кириченко И.А. Создание гиперболоидных передач с линейным контактом зубьев на базе специальных режущих инструментов: дисс. ...

доктора техн. наук / И.А. Кириченко. – Луганск, 2004. – 350 с.

158. Кириченко И.А. Шлифование зубьев цилиндрических колес гиперболоидными абразивными червяками / И.А. Кириченко // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: СУДУ, 1999. – № 3 (18). – С. 125 – 129.

159. Колчин Н.И. Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений / Н.И.Колчин. – М.: Машгиз, 1949. – 210 с.

160. Колчин Н.И. Кривизна сопряженных поверхностей в пространственных зацеплениях/ Н.И.Колчин // АН СССР. Труды семинара по ТММ. – 1953. – №49. – С. 33 – 39.

161. Координатно-измерительные машины и технологии измерений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ito-news.ru/archive/2013/1304ito36lapic.pdf> (дата обращения 31.10.2016).

162. Коростелев Л.В. Кинематические показатели несущей способности пространственных зацеплений. / Л.В.Коростелев // Известия ВУЗов. «Машиностроение». – 1964. – №10. – с.10 – 15.

163. Коростелев Л.В. Кривизна взаимоогibaемых поверхностей в пространственных зацеплениях / Л.В.Коростелев // Сб. "Теория передач в машинах". - М.: Машгиз, 1963. – С. 26 – 36.

164. Короткин В.М. Зубчатые передачи Новикова / В.М. Короткин, Ю.Д. Харитонов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1991. – 208 с.

165. Красин В.Н. Оптимизация геометрии зубчатых кинематических передач / В.Н.Красин, В.В.Логинов // Машиноведение. – 1981. – №3. – С.55 – 57.

166. Краснощеков Н.Н. Теория зацепления Новикова / Н.Н. Краснощеков, Р.В. Федякин, В.А. Чесноков. – М.: Наука, 1976. – 176 с.

167. Кривошея А.В. Изготовление моделей и функциональных опытных образцов алмазных зубообрабатывающих инструментов с использованием метода ускоренного лазерного прототипирования / А.В.

Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, В.В. Кривошея, В.Т. Чалый, Ю.Б. Витязев, Е.А. Садовниченко // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. – Вып.73. – С. 124 – 136.

168. Кривошея А.В. Разработка концепции, структуры и принципов создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач / А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, Н.Э. Тернюк, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – №34(1143). – С. 64 – 74.

169. Крылов Н.Н. Исследование геометрии зубчатых зацеплений с точечным контактом: автореф. дис. на соискание уч. степени доктора техн. наук / Н.Н. Крылов. – Москва, 1966. – 44 с.

170. Крылов Н.Н. Кривизна сопряженных поверхностей глобоидного зацепления с точечным контактом. / Н.Н.Крылов // Зубчатые передачи с зацеплением Новикова. –М.: Изд. ВВИА им. Жуковского, 1964. – Вып.3. – С. 75–86.

171. Крылов Н.Н. Поверхность приведенной кривизны / Н.Н.Крылов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1964. - № 12. – С.12 – 19.

172. Кудрявцев В.Н. Конструкция и расчет зубчатых редукторов. / В.Н. Кудрявцев, Ю.А. Державец, Г.Л., Глухарев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 328 с.

173. Кучма Ю. В. Підвищення технічного рівня зубчастих конічних передач Новікова на основі багатокритеріальної оптимізації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.02 – «Машинознавство» / Ю.В. Кучма. – Луганськ, 2001. – 26 с.

174. Лашнев С.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. / С.И. Лашнев, М.И. Юликов. – М.: Машиностроение, 1975. – 391с.

175. Ленский М.Ф. Синтез зубчатых и кулачковых механизмов по

качественным показателям: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. / М.Ф.Ленский. – Л., 1968. – 20 с.

176. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с.

177. Литвин Ф.Л. Применение кинематического метода для определения кривизн и условий отсутствия огибающей двухпараметрического семейства инструментальных поверхностей / Ф.Л. Литвин, М.Л. Ерихов // Механика машин. – М.: Наука, 1966. – №3. – 11 с.

178. Литвин Ф.Л. Применение кинематического метода для определения связи между кривизнами взаимоогibaемых и условий отсутствия подрезания зубцов / Ф.Л.Литвин // Труды семинара по теории машин и механизмов. – АН СССР, 1964. – Вып. 103. – С. 89 – 97.

179. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л.Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

180. Литвиняк Я.М., Підвищення технологічної гнучкості операцій формоутворення зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві / Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай, Є.М. Махоркін // Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні: Міжгалузовий збірник наукових праць. – 2008. – Вип. 42. – С. 32 – 37.

181. Локтев Д.А. Современные методы контроля качества цилиндрических зубчатых колес // Оборудование и инструмент. Металлообработка. – 2009. – №4. – С. 6 – 11.

182. Лурье Г.Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г.Б. Лурье, В.Н. Комиссаржевская. – М.: Высш.шк., 1972. – 416 с.

183. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В.С. Люкшин. – М.: Машиностроение, 1967. – 327 с.

184. Мамлюк О.В. Развитие теории формообразования поверхностей резанием: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.01 / О.В. Мамлюк. – Киев, 2007. – 247 с.

185. Математика и САПР: В 2-х кн. / П. Шенен, М. Коснар, И. Гардан, Ф. Робер, И. Робер, П. Витомски, П. Кастельжо. – М.: Мир, 1988. – 204 с.
186. Медведев Ф.В. Автоматизированное проектирование и производство деталей сложной геометрии на базе программного комплекса PowerSolution: учеб. пособие / Ф.В. Медведев, И.В. Нагаев; под ред. А.Г. Громашева. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005 – 167с.
187. Мобильная координатно-измерительная машина FARO Edge ScanArm HD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tesis.com.ru/equip/kimfaro/scanarm_hd.php (дата обращения 08.11.2016).
188. Николаев А.Ф. Кинематические основы теории пространственных зацеплений: автореф. дис. ... доктора техн. наук / А.Ф. Николаев – М. 1953. – 38 с.
189. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1958. – 186 с.
190. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И. П. Норенков. – [4-е изд.]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.
191. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур: ГОСТ 13755-81. – [Введен в действие 1981-02-27]. – М.: Государственный комитет по стандартам СССР, 1981. – 8 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
192. Охріменко О.А. Загальні основи теорії проектування черв'ячних фрез: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / О.А. Охріменко. – Київ, 2015. – 42 с.
193. Павленко А.Ф. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова / А.Ф. Павленко, Р.В. Федякин, В.А. Чесноков. – К.: Техника, 1978. – 144 с.
194. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений / А.И.Павлов. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100 с.
195. Павлов А.М. Непосредственная связь радиусов кривизны зубьев в пространственных зацеплениях. / А.М. Павлов // Зубчатые и червячные

передачі. – Л.: Машиностроение, 1968. – С. 24 – 35.

196. Павлов А.М. Определение кривизны взаимноогibaемых поверхностей в пространственных зацеплениях / А.М. Павлов // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. – 1960. – № 211. – С.101 – 109.

197. Паршин А.Н. Разработка методов анализа, синтеза зацепления и изготовления арочных цилиндрических зубчатых колес: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18 / Александр Николаевич Паршин. - М., 2008.- 159 с.

198. Пастернак С.І. Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом / С.І. Пастернак, Ю.М. Данильченко, М.Г. Сторчак, А.В. Кривошея // Вістник НТУ "ХПІ" :Проблеми механічного приводу. – 2009. –№19 – С. 17 –25.

199. Пат. №25541А. Україна, МКИ В23F1/00. Спосіб обробки бочкоподібних зубців / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052065; заявл. 05.05.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

200. Пат. №25543А. Україна, МКИ F16H1/08. Зубчата передача / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97041926; заявл. 22.04.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

201. Пат. №29761А. Україна, МКИ В23F1/00, В23F21/00. Спосіб нарізування зубчатих коліс з двовгнутими зуб'ями та інструмент для його здійснення/ Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052444; заявл. 27.05.97; опубл. 15.11.2000; Бюл.№6–II.

202. Пат. 34475. Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс / О.В. Вітренко, О.С. Вітренко, І.О. Кириченко, заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №200803692; Заявл. 24.03.2008; Опубл. 11.08.2008, Бюл. №15.

203. Пат. 40480 Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс / О.В. Вітренко, О.С. Вітренко, І.О.

Кириченко, заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №200813259; Заявл. 17.11.2008; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.

204. Пат. 44215 Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс / О.В. Вітренко, заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля. – №200903482; Заявл. 10.04.2009; Опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.

205. Пат. №68546. Украина, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс та інструментів / О.В. Вітренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, М.М. Кузнецова; заявник і патентовласник Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М. – №u201111822; заявл. 07.10.2011; опубл. 26.03.2012; Бюл.№6.

206. Пекарш А.И. Координатно – измерительные машины и комплексы / А.И. Пекарш, С.И. Феоктистов, Д.Г. Колыхалов, В.И. Шпорт // Наука и техника в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 36 – 48.

207. Передачі зубчасті. Словник термінів. Частина 1. Визначення, що стосуються геометрії: ДСТУ ISO 1122–1. – [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2013. – 68 с. – (Національні стандарти України).

208. Передачи Новикова цилиндрические с двумя линиями зацепления. Исходный контур: ГОСТ 15023-76. – [Введен в действие 1976-07-30]. – М.: Государственный комитет по стандартам СССР, 1976. – 5 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

209. Перепелица Б.А. Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учеб. пособие. / Б.А. Перепелица. – Харьков: ХПИ, 1985. – 107 с.

210. Перепелица Б.А. Отображения аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. / Б.А. Перепелица. – Харьков: Выща школа, 1981. – 152с.

211. Петров А.С. Использование новых информационных технологий

при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып.8. – С.170 – 173.

212. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: междунар. науч.-техн. конф. 13 – 18 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Севастополь: Дон ГТУ, 1999. – Т 2. – С. 254 – 257.

213. Письманик К.М. Некоторые вопросы теории зацепления в технологии гипоидных передач / К.М. Письманик // Теория и расчет зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1949. – С. 135 – 142.

214. Плахтин В.Д. Анализ зацепления и технология изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями с применением автоматизированного комплекса TFlex / В.Д. Плахтин, И. Г. Панков, А.П. Давыдов, А.Н. Паршин // CAD/CAM/CAE информационно аналитический PLM журнал. – 2007. – № 6(36). – С. 63 – 65.

215. Плахтин В.Д. Изготовление зубчатых колес с арочными зубьями с применением пальцевых фрез / В.Д. Плахтин, А.П. Давыдов, А.Н. Паршин // Технология машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 12 – 15.

216. Плахтин В.Д. Параметры пальцевой фрезы и станочного зацепления при изготовлении зубчатых колес с арочными зубьями / В.Д. Плахтин, А.П. Давыдов, А.Н. Паршин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2007. – №4. – С. 95 – 102.

217. Погорелов А. В. Аналитическая геометрия / А.В.Погорелов. – М.: Наука, 1978. – 176 с.

218. Погорелов А. В. Дифференциальная геометрия. / А. В. Погорелов. – [6-е изд.]. – М.: «Наука», 1974. – 176 с.

219. Подкорытов А.Н. Теоретические основы автоматизированных методов геометрического моделирования сопряженных криволинейных поверхностей, исключаящих интерференцию: дисс. докт. техн. наук.:

05.01.01 "Прикладна геометрія, інженерна графіка" / А.Н. Подкорытов – М., 1989. – 219 с.

220. Подкорытов А.Н. Исключение интерференции сопряженных поверхностей зубчатых передач / А.Н. Подкорытов // Международный конгресс «Зубчатые передачи». – София, 1995. – С.143 – 145.

221. Прохоров В.П. Структурно-параметрическая оптимизация передач зацеплением / В.П.Прохоров // Совершенствование конструкции и технологии зубообработки передач зацеплением: научно-техн. конф.: тезисы докл. – Ижевск, 1984. – С.18 – 20.

222. Прохоров В.П. Элементы качественного синтеза зацеплений с параллельным расположением осей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.01 "Прикладна геометрія, інженерна графіка" / В.П.Прохоров. – М., 1975. – 25 с.

223. Равська Н.С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці: навч. посіб. для студентів механічних спец. ВНЗ / Н.С. Равська, П.П. Мельничук, О.В. Мамлюк, Т.П. Ніколаєнко, О.А. Охріменко. – Київ, 2013. – 215 с.

224. Равская Н.С. Развитие теории формообразования поверхностей резанием / Н.С. Равская, П.Р. Родин, О.В. Мамлюк // Вестник двигателестроения. – 2007. – №2. – с. 70 – 76.

225. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. / С.П. Радзевич. – К.: Растан, 2001. – 592с.

226. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С.П. Радзевич. – К.: Вища шк., 1991. – 192 с.

227. Рашевский П.К. Дифференциальная геометрия / П.К. Рашевский. – ГОНТИ, 1939. – 356 с.

228. Рашевский П. К. Курс дифференциальной геометрии / П.К. Рашевский. – [3-е изд.]. – М.-Л.: Изд-во техн.-теор. лит., 1950. – 428 с.

229. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман – М.: Машиностроение, 1986. – 336с.

230. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. / П.Р. Родин. – Киев: Вища школа, 1984. – 431с.
231. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов: учебник. / П.Р. Родин. – К.: Вища шк., 1990. – 424 с.
232. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р.Родин. – К.: Вища школа, 1977. – 192 с.
233. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70764. Комп'ютерна програма «APACE»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71354; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
234. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70763. Комп'ютерна програма «COPTeR»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71353; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
235. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70766. Комп'ютерна програма «COSET»/ Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська, Д.О. Чаплинський. – №71356; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
236. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70765. Комп'ютерна програма «SAIAT»/ Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова, Д.О. Чаплинський. – №71355; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
237. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70762. Комп'ютерна програма «SCOT»/ Б.С. Воронцов, С.Б. Воронцов. – №71352; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.
238. Севрюк В.Н. Теория круговинтовых поверхностей в проектировании передач Новикова / В.Н. Севрюк. – Харьков: ХГУ. 1972. – 165 с.
239. Сегаль М.Г. Соотношения между кривизнами взаимоогibaемых поверхностей зубьев в пространственных зацеплениях / М.Г. Сегаль // Механика машин. – М.: Наука, 1969. –Вып. 19–20. – С. 130 – 140.
240. Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров. – М.: Машиностроение, 1963. – 952 с.

241. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / Александр Степанов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. - № 4 (13). – С. 53-59.

242. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / Александр Степанов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2004. - № 2 (15). – С. 53-57.

243. Стечкин С.Б. Сплайны в вычислительной математике / С.Б. Стечкин, Ю.Н. Субботин. – М.: Наука; 1976. – С. 248.

244. Сурков И.В. Автоматизация контроля геометрических параметров зубчатых колес и зуборезных инструментов / VI Всерос. науч.-техн. конф. «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин. Роботизация и автоматизация» [Электронный ресурс]. – Уфа, 2016. – Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/docs/ufa2016-1.pdf> (дата обращения 31.10.2016).

245. Сурков И.В. Координатные измерения линейно-угловых параметров зубчатых колес / И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. –2007. – №6. – С. 2 – 6.

246. Сурков И.В. Современные средства контроля линейно-угловых параметров зубчатых колес/ И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. –2007. – №4. – С. 48 – 51.

247. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 369 с.

248. Тернюк Н.Э. Системно-процессное моделирование технических систем в CALS-технологиях / Н.Э. Тернюк, Ю.В. Дудукалов, В.В. Федченко, Н.Н. Гладка // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С.124 – 133.

249. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: курс лекций / Г. А. Тимофеев. – М.: ИД Юрайт, 2010. – 351 с.

250. Ткаченко В.П. Методы твердотельного моделирования зубчатых колес тяговых передач / В.П. Ткаченко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: IX междунар. науч.-техн. конф., 13 – 17 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1999. – С. 12.

251. Ткач П.М. Виробна поверхня та верстатне зачеплення циліндричних прямозубих синусоїдальних передач / П.М. Ткач // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – №1 (70). – С. 112 – 121.

252. Устиненко А.В. Математическое моделирование процессов усталостного разрушения зубьев / А.В. Устиненко // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. научн. трудов. Тем.вып. "Машиноведение и САПР". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – №22. – С.170–175.

253. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Книга 2. Проектирование машин и их деталей: учеб.-прак. пос. / В.Н. Фещенко. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 400 с.

254. Цепков А.В. Определение профиля круга для затылования инструментов с прямолинейной режущей кромкой / А.В. Цепков // Станки и инструменты. – 1976. – №12. – С. 38-39.

255. Черкунов С.А. О кривизне сопряженных профилей круглых колес / С.А. Черкунов // Труды семинара по теории машин и механизмов. – Изд-во АН СССР, 1947. – Вып. 9. – С. 6.

256. Чесноков В.А. Определение особых точек на огибающей поверхности для общего случая / В.А. Чесноков, В.П. Шишов, В.М. Берлин // Изв. вузов. Машиностроение. – 1973. – №10. – С. 81 – 87.

257. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел / Г.И.Шевелева. – М.: Изд-во «Станкин», 1999. – 494 с.

258. Шелег В. К. Технологическое обеспечение параметров точности и качества сложнопрофильных деталей при высокоскоростной многокоординатной обработке / В. К. Шелег, А. Ф. Присевок, П. Н. Клавсуть // Вестник БНТУ. – 2009. – № 5. – С. 22 – 33.

259. Шишков В.А. Образование поверхностей резанием по методу

обкатки. / В.А. Шишков. – М.: Машгиз, 1951. – 150 с.

260. Шишов В.П. Високонавантажені циліндричні передачі з двоопукло-ввігнутими зубцями: монографія. / В.П. Шишов, П.Л. Носко, П.М. Ткач, П.В. Філь. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2005. – 216 с.

261. Шишов В.П. Показатели нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач с корсетными зубьями / В.П.Шишов, П.В.Филь, П.Н.Ткач // ВісникСхідноукр. держ. ун-ту. – Луганськ: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2000. – №5 (27). – С. 254-258.

262. Шишов В.П. Синтез передач зацеплением с экстремальными качественными показателями несущей способности. / В.П. Шишов, В.И. Подройко // Вестник машиностроения. – 1985. – №8. – С.33 – 35.

263. Шишов В.П. Теория, математическое обеспечение и реализация синтеза высоконагруженных передач зацеплением для промышленного транспорта: дис... доктора техн. наук / В.П. Шишов. Луганск, 1994. – 525 с.

264. Шишов В.П. Цилиндрические передачи с арочными зубьями (теория, анализ, синтез) / В.П. Шишов, П.Л. Носко, О.А. Ревякина. – Луганск: Изд-во ВНУ им.В.Даля, 2004. – 336 с.

265. Шульц В.В. Геометрическая оптимизация зубчатой передачи по износу / В.В. Шульц // Теория механизмов и машин. - Алма-Ата: Наука, 1977. – С. 159 – 190.

266. Шульц В.В. Оптимальные линии контакта эвольвентных червячных передач. / В.В.Шульц, В.В. Тихомиров // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1985. – № 8. – С. 18 – 21.

267. Юдин В.А. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для вузов / В.А Юдин., Л.В. Петрокас. – [2-е изд.] – М.: Высш. школа, 1977. – 527 с.

268. Юликов М. И. Проектирование и производство режущего инструмента / М. И. Юликов, Б. И. Горбунов, Н. В. Колесов. – М. Машиностроение, 1987. – 296 с.

269. Якимов А.В. Качество изготовления зубчатых колес / А.В.

ЯКИМОВ. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

270. Adedeji B. Badiru. Additive Manufacturing Handbook. Product Development for the Defense Industry / Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, David Liu. – CRC Press, 2017. – 911 p.

271. Amirouche F.M.L. Computer-Aided Design and Manufacturing / F.M.L. Amirouche. – Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1993. – 538 p.

272. Bezier P. The Mathematical Basis of the UNIURF CAD System / P. Bezier. – Butterworth-Heinemann, 2014. – 72 p.

273. Brent R.P. Algorithms for minimization without derivatives / R.P. Brent. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1973. – 204 p.

274. Chao-Hwa Chang. NC Machine Programming and Software Design / Chang Chao-Hwa, M.M. Melkanoff. – Prentice Hall, 1989. – 589 p.

275. Choi, B.K. Sculptured Surface Machining. Theory and Application / B.K. Choi, R.B. Jerard. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1998. – 368 p.

276. Cox M.G. The Numerical Evaluation of B-splines / M.G. Cox. – J. Inst. Maths. Applies, 1972.– Vol. 15. – P. 95-108.

277. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – Springer, 2015. - 510 p.

278. Heisel, U. Jede Verzahnung Mit Einem Werkzeugherstellbar / U. Heisel, S. Pasternak, M. Storchak, T. Stehle. – In: dima – die Maschine, 2009. – № 5. – P. 44 – 45.

279. Heisel, U. Modellieren des Verzahnensmit Scheiben Werkzeugen / U. Heisel, Yu. Danylchenko, S. Pasternak, M. Storchak, M. Schaal. – ZWF – Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2010 – №7 – 8. – P. 649 – 654.

280. High accuracy non-contact sensor 3D metrology system HN-C3030 [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/hn-c3030-en.pdf> (дата звернення 10.11.2016).

281. Litvin F.L. Gear Geometry and Applied Theory / F.L. Litvin. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994. – 724с.
282. Litvin F.L. Development of Gear Technology and Theory of Gearing / F.L. Litvin. – NASA RP-1406, 1998. – 113 с.
283. Marciniak K. Geometric Modeling for Numerically Controlled Machining / K. Marciniak. – Oxford University Press, N.Y., 1992. – 416 p.
284. MarGear. Техника измерения зубчатых колес [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://finval.ru/upload/catalog/instr/mahr/izmerenie_zubchatih_koles.pdf (дата обращения 12.11.2016).
285. Pasichnyk V. Reengineering gear based on the model of unified description parameter / V. Pasichnyk, B. Vorontsov // *Tecnika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017): IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna*, 6-9 czerwca 2017. – Rzeszów–Czarna. – P. 49.
286. Pasternak S. Machining strategies for gear cutting with disc-shaped milling tools / S. Pasternak, Y. Danylchenko, U. Heisel // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування* - 2015. - №2 (74). – С. 61 – 66.
287. Schoenberg I.J. Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions / I.J. Schoenberg. – *Quart. Appl. Math*, 1946. – Vol. 4 – PP. 45 – 99, 112 – 141.
288. Surkov I.V. Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / I.V. Surkov // *Measurement Techniques*. – 2011. – Vol. 54. – P. 758 – 763.
289. Vitrenko V.A. Rolling of teeth of cylindrical teeth– wheels / V.A. Vitrenko, B.S. Vorontsov, I.A Kirichenko // *Les technologies modernes de l'industrie mecanique et les problemes de la formation des cadres d'ingenieurs*. – Mahdia (Tunisie) UNTD, 2008. – P. 77 – 80.
290. Vitrenko A.V. Vytvorenie tvare hyperboloidu šípových ozubených kolies s lineárnou povahou zubov dotyk / A.V. Vitrenko, B.S. Vorontsov, M. Boshanski // *Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2013 pri príležitosti 44. výročia založenia Technickej fakulty SPU v Nitre a 20.*

Medzinárodného stojárskeho veľtrhu v Nitre: zborník vedeckých prac. – Nitra (Slovensko), 2013. – S. 64 – 68.

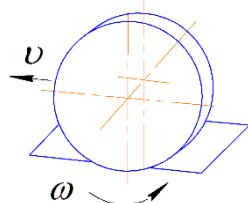
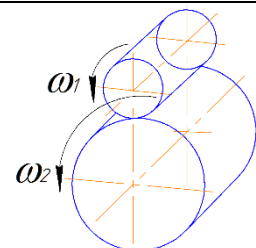
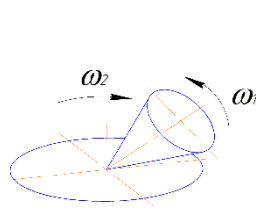
291. Vorontsov B.S. Improving the efficiency of CAD / CAM / CAE gear systems / B.S. Vorontsov, D.A. Chaplinsky // The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRLUTSTP): VI International Conference, December 2-9, 2007. – Hurghada (Egypt), 2007. – P. 129 – 131.

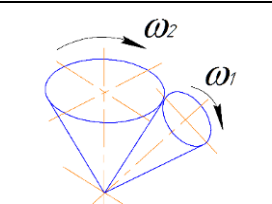
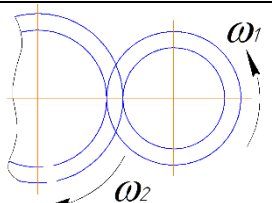
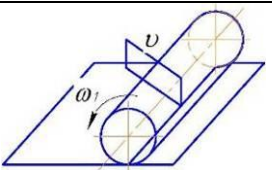
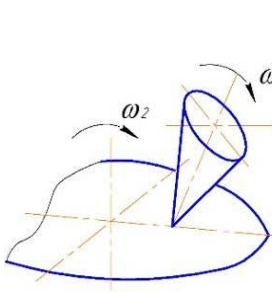
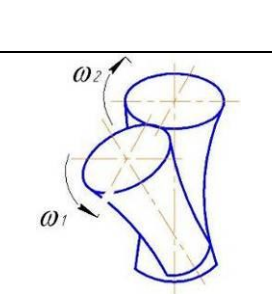
ДОДАТОКИ

Додаток А

Таблица А.1

Классификация кинематических схем формообразования [207]

Класс схемы	Тип схемы	Относительное движение изделия и инструмента при профилировании		Представление относительного движения с помощью аксоидов	Эскиз взаимного расположения аксоидов	Аксоид	
		Составляющие	Суммарное мгновенное			инструмента	изделия
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	Поступательное	Поступательное			Прямая	Прямая
	2	Вращательное	Вращательное			Прямая	Прямая
	3	Винтовое	Винтовое			Прямая	Прямая
2	1	Вращательное и поступательное, скорость которого перпендикулярна к оси вращения	Вращательное	Качение цилиндра по плоскости		Плоскость Цилиндр	Цилиндр Плоскость
	2	Два вращения вокруг параллельных осей, исключая пару вращений	Вращательное	Качение цилиндра по цилиндру		Цилиндр	Цилиндр
	3	Два вращения вокруг пересекающихся осей, (угол между осью мгновенного относительного вращения и осью одного из составляющих вращений-прямой)	Вращательное	Качение конуса по плоскости		Конус Плоскость	Плоскость Конус

1	2	3	4	5	6	7	8
2	4	Два вращения вокруг пересекающихся осей	Вращательное	Качение конуса по конусу		Конус	Плоскость Конус
	5	Пара вращений	Поступательное	Скольжение по кольцу		Кольцо	Кольцо
3	1	Вращательное и поступательное, скорость которого направлена под углом к оси вращения	Винтовое	Качение со скольжением цилиндра по плоскости		Плоскость Цилиндр	Цилиндр Плоскость
	2	Два вращения вокруг скрещивающихся осей (угол между одной из осей вращения и осью результирующего винта прямой. Ось мгновенного винта и вторая ось вращения - пересекающиеся прямые)	Винтовое	Качение со скольжением конуса по плоскости		Плоскость Конус	Конус Плоскость
	3	Два вращения вокруг скрещивающихся осей	Винтовое	Качение со скольжением гиперboloида по гиперboloиду		Гиперboloид	Гиперboloид

Додаток Б

Опис програмного забезпечення «SAIAT» [24]

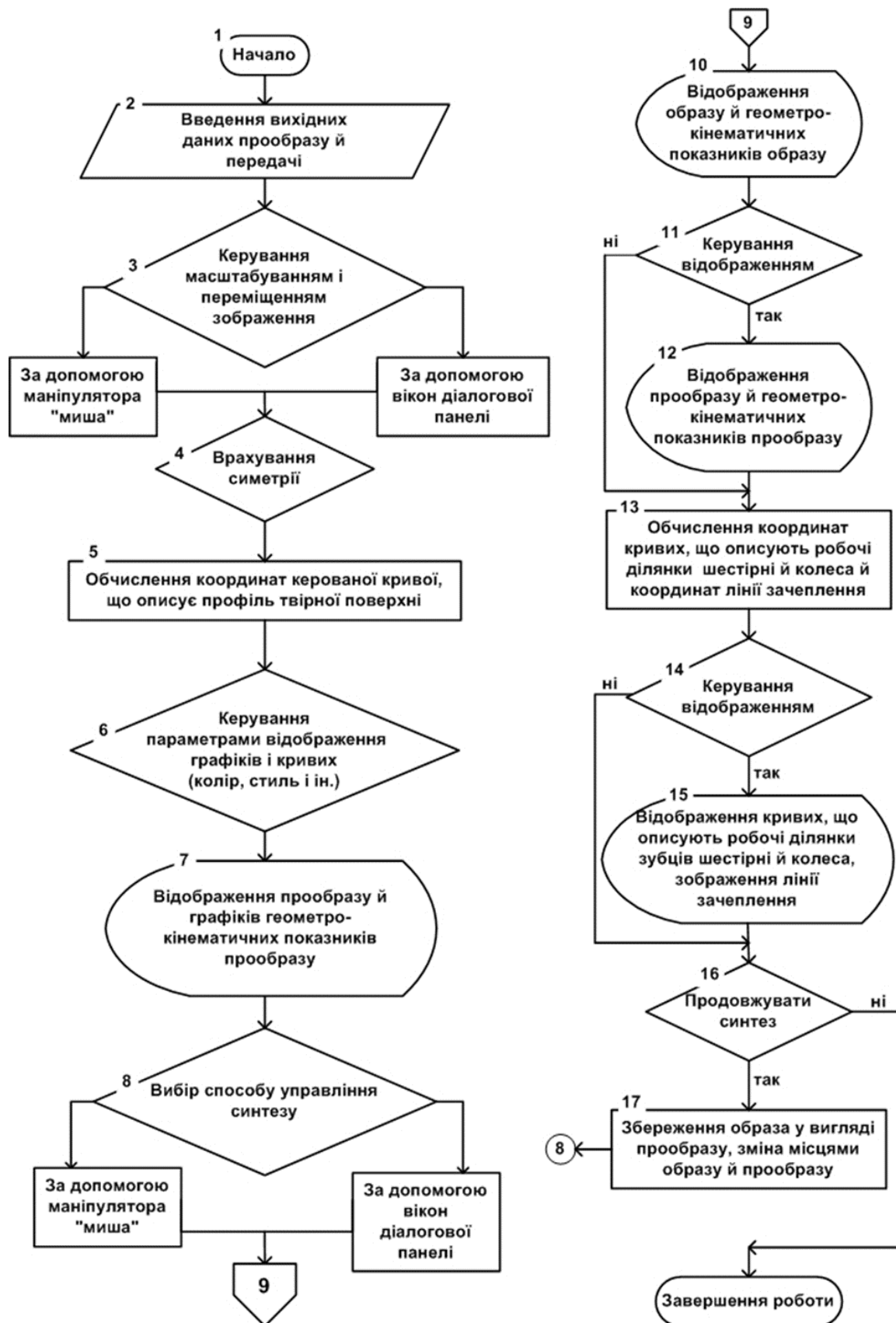


Рис. Б.1. Блок-схема програмного забезпечення «SAIAT»

Інтерфейс системи складається з таких елементів (рис. Б.2):

- робочого вікна, в якому здійснюється зміна форми кривої за допомогою керуючих точок;
- інструментальної панелі з діалоговими вікнами, які слугують як для відображення поточної інформації, так і для керування синтезом;
- вікна з графіками геометричних та кінематичних показників, які можна переміщати по екрану і, при необхідності, відключати.

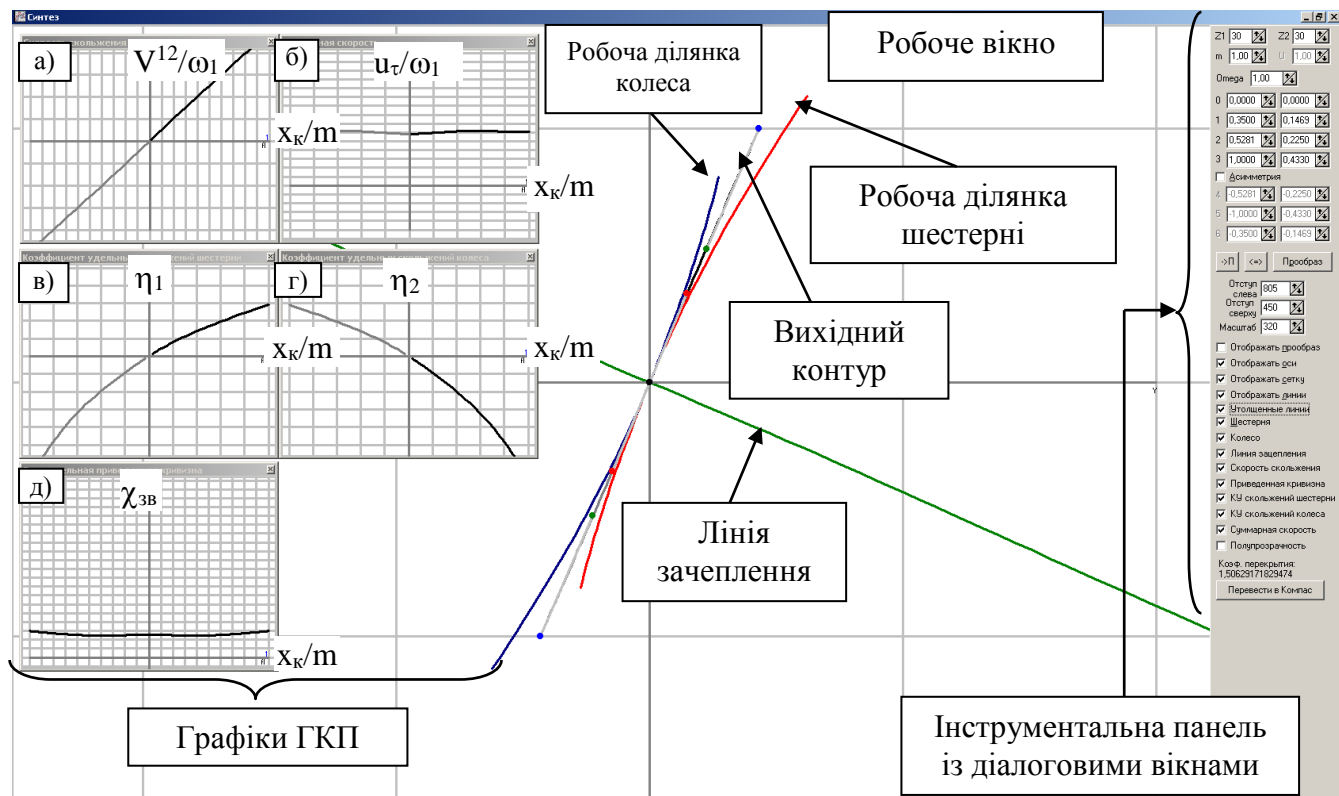


Рис.Б.2. Інтерфейс системи:

- а) швидкість ковзання робочих поверхонь; б) сумарна швидкість переміщення точок контакту; в-г) коефіцієнти питомих ковзань шестерні і колеса; д) зведена кривизна поверхонь зубців

Інструментальна панель з діалоговими вікнами складається з таких функціональних зон:

Зона параметрів зубчастої передачі (рис. Б.3), яка слугує для відображення і зміни кількості зубів передач Z_1 і Z_2 , модуля m (мм),

передаточного числа U , кутової швидкості ведучого колеса ω (сек^{-1}).

Рис. Б.3. Зона параметрів зубчастої передачі

Зона координат керуючих точок (рис. Б.4), яка слугує для відображення поточних значень координат керуючих точок і, при необхідності, введення їх значень з клавіатури. При включенні опції «Асиметрія» доплюсною ділянкою кривої можна керувати незалежно від заплюсної.

0	0,0000	-0,7854
1	0,2959	-0,7586
2	0,5740	-0,6251
3	1,0000	-0,3524
<input checked="" type="checkbox"/> Асимметрия		
4	-0,5740	-0,9457
5	-1,0000	-1,2184
6	-0,2959	-0,8122

Рис. Б.4. Зона координат керуючих точок

Зона керування прообразом (рис. Б.5), яка слугує для введення поточних значень координат кривої, як нового прообразу, а також для зміни місцями образу кривої і її прообразу.

Рис. Б.5. Зона керування прообразом

Зона керування зображенням в робочому полі (рис. Б.6), яка слугує для масштабування і переміщення зображення кривої. Переміщення можна здійснювати також за допомогою правої кнопки миші, а масштабування за допомогою коліщатка на миші.

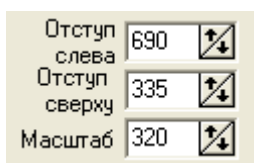


Рис. Б.6. Зона керування зображенням в робочому полі

Зона включення/вимикання допоміжних ліній, відображення прообразу і управління товщиною ліній відтворення (рис. Б.7).

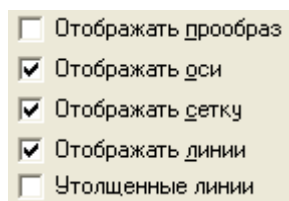


Рис. Б.7. Зона включення/вимикання допоміжних ліній

Зона включення/вимикання графіків геометричних та кінематичних показників (рис. Б.8).

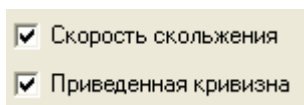


Рис. Б.8. Зона включення/вимикання графіків геометричних та кінематичних показників

Зона включення/вимикання видимості ліній робочих ділянок зубців шестерні і колеса, а також видимості лінії зацеплення (рис. Б.9).

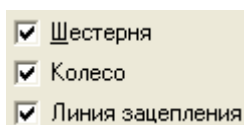


Рис. Б.9. Зона включення/вимикання видимості ліній

Можливі два варіанти керування формою кривої, яка описує твірну поверхню. Перший варіант, коли в якості прообразу обрана довільна крива для даних параметрів зубчастих передач. Переміщаючи за допомогою курсору керуючі точки, підбираються такі геометричні та кінематичні показники, які найбільш повно відповідають технічним вимогам, що

пред'являються до передач (рис. Б.10.)

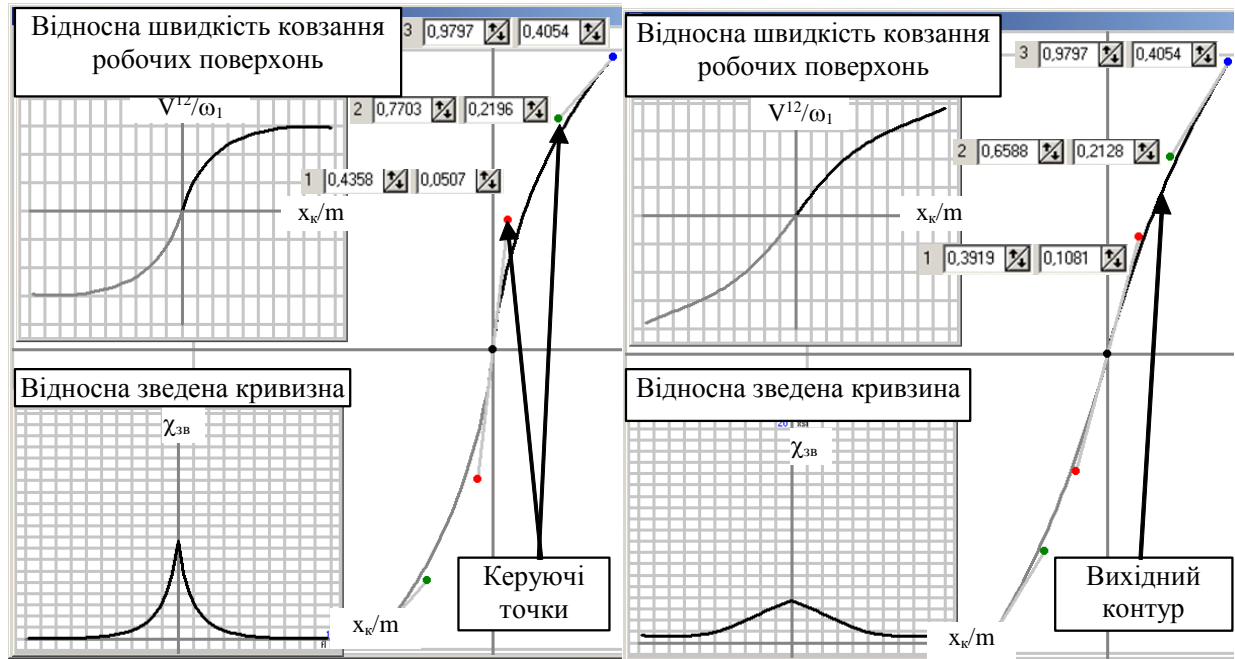


Рис. Б.10. Зміна положення керуючих точок за допомогою курсору миші

Другий варіант синтезу використовується, коли необхідно поліпшити показники вже існуючого контуру твірної поверхні. У цьому випадку в якості прообразу вибирається крива, яка апроксимує відомий контур твірної поверхні. Далі, за допомогою керуючих точок, здійснюється порівняльний аналіз геометричних та кінематичних показників передач (рис. Б.11).

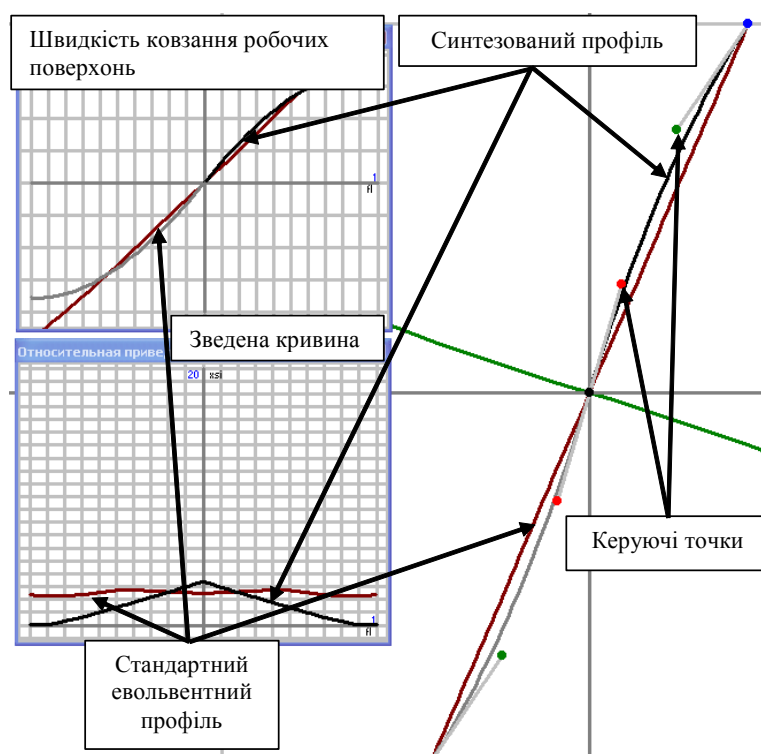


Рис. Б.11. Порівняльний аналіз геометричних та кінематичних показників

Додаток В

Свідоцтва про реєстрацію авторських прав на твори

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70762

Комп'ютерна програма "SCOT"
(вид, назва твору)

Автор(и) **Воронцов Борис Сергійович, Воронцов Сергій Борисович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2017





Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70763

Комп'ютерна програма "СОРТеR"
(вид, назва твору)

Автор(и) **Воронцов Борис Сергійович, Чаплинський Дмитро Олександрович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2017




Голова Державної служби інтелектуальної власності України
В.О. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70764

Комп'ютерна програма "APACE"
(вид, назва твору)

Автор(и) **Воронцов Борис Сергійович, Чаплинський Дмитро Олександрович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2017



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
В.о. Голови А.А. Малиш



УКРАЇНА



• ДЕРЖАВНА СЛУЖБА • • ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ •

• ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ •

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 70765

Комп'ютерна програма "SA|AT"

(вид, назва твору)

Автор(и) **Воронцов Борис Сергійович, Бочарова Ірина Анатоліївна,
Чаплинський Дмитро Олександрович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2017



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України

В.о. Голови А.А. Малиш



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70766

Комп'ютерна програма "COSET"
(вид, назва твору)

Автор(и) Воронцов Борис Сергійович, Чаплинська Тетяна Миколаївна,
Чаплинський Дмитро Олександрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2017




Голова Державної служби інтелектуальної власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

Додаток Г

Патенти за темою дисертації



УКРАЇНА

(19) UA (11) 25541 (13) A

(51) B23F1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) Спосіб обробки бочкоподібних зубців

(21) 97052065

(22) 05.05.1997

(24) 30.10.1998

(33) UA

(46) 25.12.1998, бюл. № 6

(72) Воронцов Борис Сергеевич

(73) ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ(57) Способ обработки
бочкообразных зубьев, которые
получают методом обката в
условиях согласованных угловых
перемещений зубчатого изделия,

отличающийся тем, что заданный
радиус кривизны бочкообразного
зуба получают за счет того, что
заготовка совершает перемещение
вдоль своей оси, зависящее от угла
поворота β этой оси в плоскости,
нормальной производящей
поверхности реечного типа и
параллельной ее продольной
образующей

$$l = (R_k - R_1 \sin \alpha)(1 - \cos \beta) / \sin \beta$$

где R_k - заданный радиус кривизны;
 R_1 - радиус делительной окружности
изготавливаемого колеса; α - угол
зацепления.

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано при изготовлении зубчатых колес тяжело нагруженных передач, работающих при перекосах осей, вызванных погрешностями изготовления и монтажа, износом и деформацией колес, валов и подшипниковых узлов.

Известен способ обработки бочкообразных зубьев (Авт. св. СССР №1291312, кл. В23F9/00, 1987) в условиях согласованных угловых перемещений зубчатого изделия методом обката, имитирующий реальные условия эксплуатации.

Недостатком данного способа является ограниченность технологических возможностей получения бочкообразных зубьев различной продольной модификации.

Известен способ обработки бочкообразных зубьев (Авт. св. СССР №1683912, кл. В23F9/00, 1991, прототип) в условиях согласованных угловых перемещений зубчатого изделия методом обката, позволяющий получить зубчатые колеса с различной продольной модификацией зубьев, мало чувствительные к перекосам осей.

Недостатком данного способа является невозможность получения заданного радиуса кривизны бочкообразных зубьев, что отрицательно сказывается на контактную прочность зуба, так как в процессе эксплуатации зубчатой передачи нагрузка передается через небольшую площадку мгновенного контакта.

В основу предложенного изобретения поставлена задача разработки способа обработки бочкообразных зубьев в условиях согласованных угловых перемещений зубчатого изделия методом обката, позволяющего получить заданный радиус кривизны бочкообразного зуба, выбранный из условия получения наибольшей площадки мгновенного контакта зубьев колес, работающих при перекосах осей, что позволяет повысить их контактную прочность.

Согласно изобретению задача достигается тем, что в процессе зубообработки заготовка совершает перемещение l вдоль своей оси, зависящее от угла поворота β этой оси в плоскости, нормальной к производящей поверхности реечного типа и параллельной ее продольной образующей

$$l = (R_k - R_1 \sin \alpha)(1 - \cos \beta) / \sin \beta,$$

где R_k - заданный радиус кривизны; R_1 - радиус делительной окружности изготавливаемого колеса; α - угол зацепления.

На чертеже (фиг.) показано формообразование боковых поверхностей бочкообразного зуба.

Рассмотрим сечение зуба 1 и производящей поверхности 2 плоскостью $A-A$, проходящей через линию зацепления параллельно оси колеса O_1 . В процессе нарезания зубьев методом обката зубчатое колесо совершает перемещение вдоль своей оси на величину $l = O_1O'_1$ с одновременным поворотом этой оси на угол β в плоскости, параллельной плоскости $A-A$. Характер зависимости $l = f(\beta)$ выбирается из условия получения заданной кривой в продольном нормальном сечении зуба. Так, если необходимо, чтобы в сечении получилась дуга окружности с радиусом R_k , зависимость определяется из соотношения:

$$(R_k - R_1 \sin \alpha) \cos \beta = (R_k - R_1 \sin \alpha) - l \sin \beta,$$

где R_1 - радиус делительной окружности нарезаемого колеса; α - угол зацепления; $R_k = KO_k$; $(R_k - R_1 \sin \alpha) = KO_1$.

Тогда

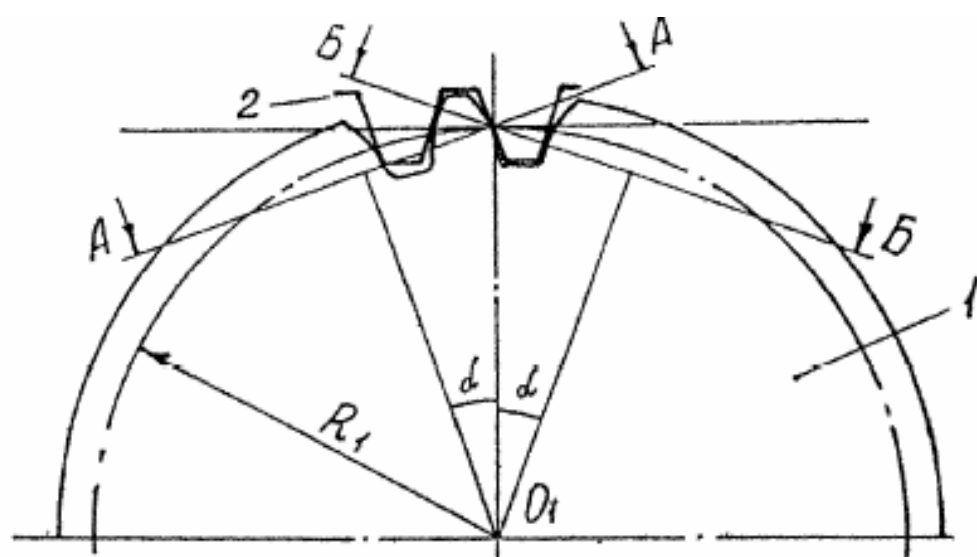
$$l = (R_k - R_1 \sin \alpha)(1 - \cos \beta) / \sin \beta.$$

Аналогичным образом получается противоположная сторона бочкообразного зуба. В этом случае рассматривается сечение $B-B$ и центр кривизны O_k образующей располагается с другой стороны зуба.

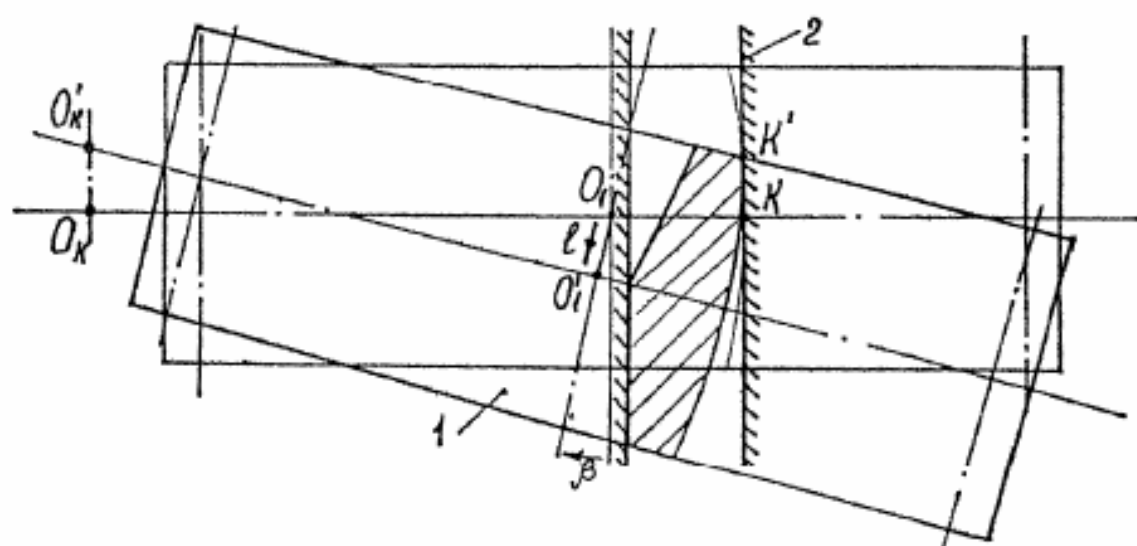
Способ осуществляется следующим образом.

Сначала производится обработка зубьев колеса методом обката таким образом, чтобы получилась заданная бочкообразная поверхность одной стороны всех зубьев (сечение $A-A$). Для этого в процессе обработки осуществляется согласованный поворот оси заготовки на угол β , и перемещение вдоль этой оси $l = f(R_k, \beta)$. После формообразования одной стороны всех зубьев колеса ось заготовки, без прекращения процесса обработки методом обката, поворачивается до совпадения с плоскостью $B-B$ с одновременным перемещением заготовки вдоль своей оси до соприкосновения другой стороны зуба на торце с производящей поверхностью. Далее процесс формообразования бочкообразной поверхности другой стороны всех зубьев осуществляется аналогично формообразованию первой стороны зубьев.

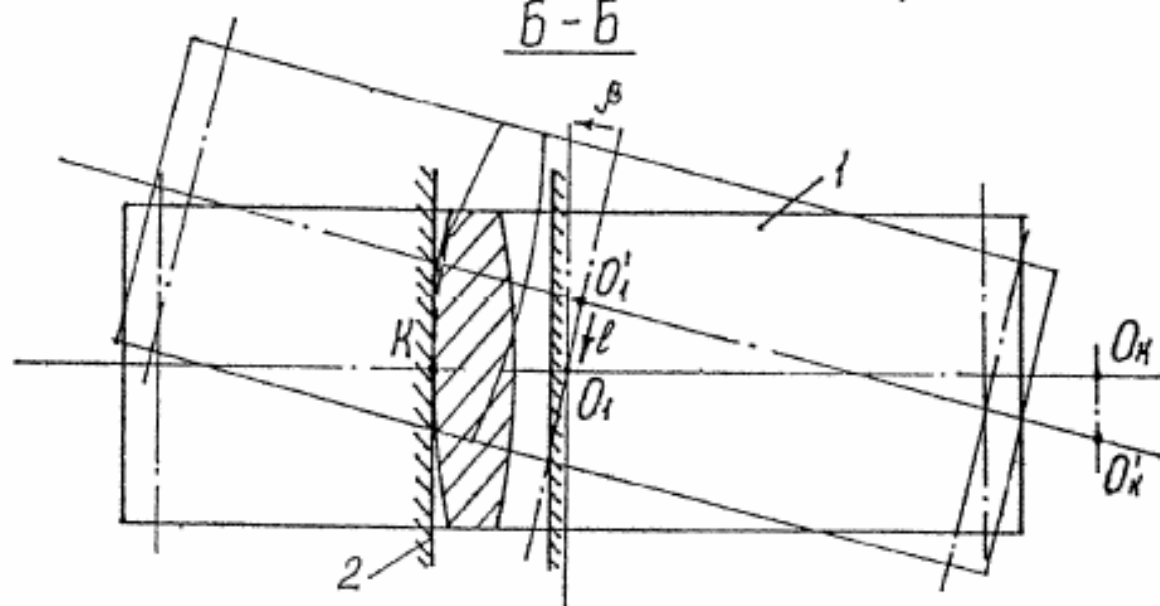
Таким образом, способ обладает широкими технологическими возможностями формообразования бочкообразных зубьев с различным заданным радиусом кривизны в любом продольном нормальном сечении зубьев. Способ осуществляется при простых согласованных перемещениях заготовки и инструмента, не требует их переустановки в процессе нарезания зубьев и позволяет применять высокопроизводительные методы зубообработки.



A-A



Б-Б



Фиг.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 25543 (13) A

(51) F16H-1/08

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ЗУБЧАТА ПЕРЕДАЧА

(21) 97041926
 (22) 22.04.1997
 (24) 30.10.1998
 (33) UA
 (46) 25.12.1998, Бюл. № 6, 1998 р.
 (72) Воронцов Борис Сергійович
 (73) СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ
 ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 (57) 1. Зубчатая передача, содержащая два колеса на параллельных осях, у которых зубья ведущего колеса в продольном направлении выполнены двояковыпуклыми, а зубья ведомого колеса - двояковогнутыми, с одинаковыми свойствами контактирования при реверсивном направлении вращения колес, отличающаяся тем, что боковая поверхность зубьев ведущего колеса, имеющих двояковыпуклую форму вдоль линии зуба, выполнена в виде двухпараметрической огибающей инструментальной поверхности реечного типа, причем первый параметр огибания определяет постоянное передаточное отношение станочного зацепления, а второй параметр определяет согласованное перемещение колеса вдоль своей оси и поворота этой оси таким образом, чтобы образующая по длине боковой поверхности зуба представляла собой дугу окружности

заданного радиуса в заданной плоскости, а боковая поверхность зубьев ведомого колеса, имеющих двояковогнутую форму вдоль линии зуба, выполнена в виде двухпараметрической огибающей боковой поверхности зуба ведущего колеса, причем первый параметр огибания определяет заданное передаточное отношение передачи, а второй - согласованное перемещение вдоль своей оси ведомого колеса в зависимости от величины перекося осей и перемещения вдоль своей оси ведущего колеса.

2. Передача по п. 1, отличающаяся тем, что образующая по длине зуба ведущего колеса представляет собой заданную кривую в заданной плоскости.
 3. Передача по п. 1, отличающаяся тем, что образующая по длине зуба ведущего колеса представляет собой ломаную прямую в заданной плоскости.
 4. Передача по п. 1, отличающаяся тем, что установлена зависимость величины перемещения ведущего колеса I вдоль своей оси от угла поворота j_1 этого колеса в процессе формообразования таким образом, что образующая по длине зуба ведущего колеса в любом нормальном сечении имеет одинаковый радиус кривизны.

(19) UA (11) 25543 (13) A

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано в силовых редукторах как в односторонним, так и реверсивным направлением вращения колес, работающих при перекосах осей, вызванных погрешностями изготовления и монтажа, износом и деформацией колес, валов и подшипниковых узлов.

Известна прямозубая цилиндрическая передача (Авт. св. СССР №602715, кл. F16H1/00, 1978), одно из колес, которой имеет продольную бочкообразную модификацию зубьев.

Недостатком данной передачи является уменьшенная в продольном направлении зуба площадка мгновенного контакта и, поэтому, пониженная нагрузочная способность.

Известна зубчатая передача (Авт. св. СССР №1240976, кл. F16H1/08, 1986, прототип), содержащая два колеса на параллельных осях, у которых зубья ведущего колеса в продольном направлении выполнены двояковыпуклыми, а зубья ведомого колеса - двояковогнутыми, с одинаковыми свойствами контактирования при реверсивном направлении вращения колес.

Недостатком данной передачи является повышенная чувствительность к перекосам осей, уменьшение при этом нагрузочной способности в результате ликвидации эффекта замыканий мгновенной линии контакта, снижение кинематической точности и возникновение вибрации в результате нарушения постоянства передаточного отношения передачи.

Кроме того, известная передача обладает сложностью и ограниченностью способов формообразования поверхностей зубьев, низкой технологичностью изготовления.

В основу предложенного изобретения поставлена задача повышения нагрузочной способности зубчатой передачи, содержащей два колеса на параллельных осях, у которых зубья ведущего колеса в продольном направлении выполнены двояковыпуклыми, а зубья ведомого колеса - двояковогнутыми, с одинаковыми свойствами контактирования при реверсивном направлении вращения колес, работающей при перекосах осей, за счет увеличения площадки мгновенного контакта вдоль зуба, повышения кинематической точности за счет обеспечения постоянства передаточного отношения, расширения технологических возможностей изготовления за счет простоты получения требуемых поверхностей зубьев высокопроизводительными способами зубообработки.

Согласно изобретению поставленная задача достигается тем, что боковая поверхность зубьев ведущего колеса, имеющая двояковыпуклую форму вдоль линии зуба, выполнена в виде двухпараметрической огибающей инструментальной поверхности реечного типа, причем первый параметр огибания определяет постоянное передаточное отношение станочного зацепления, а второй - согласованное перемещение колеса вдоль своей оси и поворота этой оси таким образом, чтобы образующая по длине боковой поверхности зуба представляла собой дугу окружности заданного радиуса в заданной плоскости, а боковая поверхность зубьев ведомого колеса, имеющая двояковогнутую форму вдоль линии зуба, выполнена в виде двух параметрической огибающей боковой поверхности зуба ведущего колеса, причем первый параметр огибания определяет заданное передаточное отношение передачи, а второй - согласованное перемещение вдоль своей оси ведомого колеса в зависимости от величины перекоса осей и перемещения вдоль своей оси ведущего колеса. В процессе эксплуатации передачи зубчатые колеса имеют возможность самоустановки или регулируемой установки вдоль своих осей для компенсации перекоса осей.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг.1 показано станочное зацепление колеса с рейкой, при формообразовании боковой поверхности зуба ведущего колеса; на фиг.2 - разрез этого зацепления плоскостью А - А; на фиг.3 - станочное зацепление колеса с инструментом при формообразовании боковой поверхности зуба ведомого колеса; на фиг.4 - разрез В - В этого зацепления и принцип работы передачи в целом.

Боковая поверхность зуба ведущего колеса 1 (фиг.2) представляет собой двухпараметрическую огибающую поверхность рейки 3 при относительном движении, причем первый параметр устанавливает зависимость угла поворота φ_1 ведущего колеса вокруг своей оси и прямолинейного перемещения рейки на величину $\varphi_1 R_1$, где R_1 - радиус делительной окружности ведущего колеса. Второй параметр устанавливает зависимость угла поворота β оси колеса в плоскости А - А, проходящей через линию зацепления, и величины перемещения $l = O_1 O'_1$ колеса вдоль своей оси таким образом, чтобы в нормальном сечении плоскостью А - А линия зуба представляла дугу окружности радиуса $R_u = KO_u$. Если вращать колесо вокруг точки O_u боковая линия зуба в сечении А - А будет представлять собой дугу окружности радиуса R_u и контактировать с инструментальной поверхностью в точке К. При этом центр колеса O_1 переместится в точку O'_1 по дуге окружности радиуса $R_w = O_1 O_u$. Это практически можно осуществить, нарезая зубчатое колесо зуборезной головкой радиуса R_u с осью, проходящей через точку O_u , перпендикулярно плоскости А - А. Однако это трудоемко и не технологично, особенно при обработке зубьев с обеих сторон. Более простым способом в практическом плане является поворот оси колеса на угол β с одновременным перемещением центра колеса вдоль своей оси на величину $O_1 O'_1$. При этом точка контактирования переместится с К в К', а центр, вокруг которого поворачивается колесо из точки O_u в точку O'_u .

Величина перемещения $l = f(\beta, R_w)$ определяется из соотношения:

$$R_w \cos \beta = R_w - l \sin \beta.$$

Тогда

$$l = R_w \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta},$$

где $R_w = R_u - KO_1 = R_u - R_1 \sin \alpha$.

Устанавливая другую зависимость $l = f(\beta, R_w)$, можно получить продольную модификацию в виде другой кривой или ломанной прямой. При установлении зависимости $l = f(\beta, R_w, \varphi_1)$ можно обеспечить

постоянный радиус кривизны в любом продольном нормальном сечении поверхности зуба.

Аналогичным образом получается противоположная сторона двояковыпуклого зуба ведущего колеса. В этом случае рассматривается сечение Б - Б и центр O_{Π} кривизны образующей будет расположен с другой стороны зуба.

Боковая поверхность зуба ведомого колеса 2 (фиг.4) представляет собой двухпараметрическую огибающую поверхность зуба ведущего колеса при относительном движении, причем первый параметр устанавливает зависимость угла поворота φ_2 ведомого колеса вокруг своей оси от угла поворота φ_1 ведущего колеса, т.е. определяет заданное передаточное отношение передачи. Вторым параметром устанавливает зависимость величины перемещения $k = O_2O'_2$ ведомого колеса вдоль своей оси от величины угла перекоса β оси ведущего колеса и перемещения l ведущего колеса вдоль своей $k = f(\beta, l)$.

Если рассматривать угол перекоса β в плоскости В - В, то величина

$$k = O_2O'_2 = KK' = O_{\Pi}O'_{\Pi} = O_1M,$$

но $O_1M = O_1O'_1 = l$, т.к. точка O_1 лежит на пересечении сторон NO'_1 и MF двух одинаковых прямоугольных треугольников FMO'_{Π} и $NO'_1O'_{\Pi}$ с общим острым углом β .

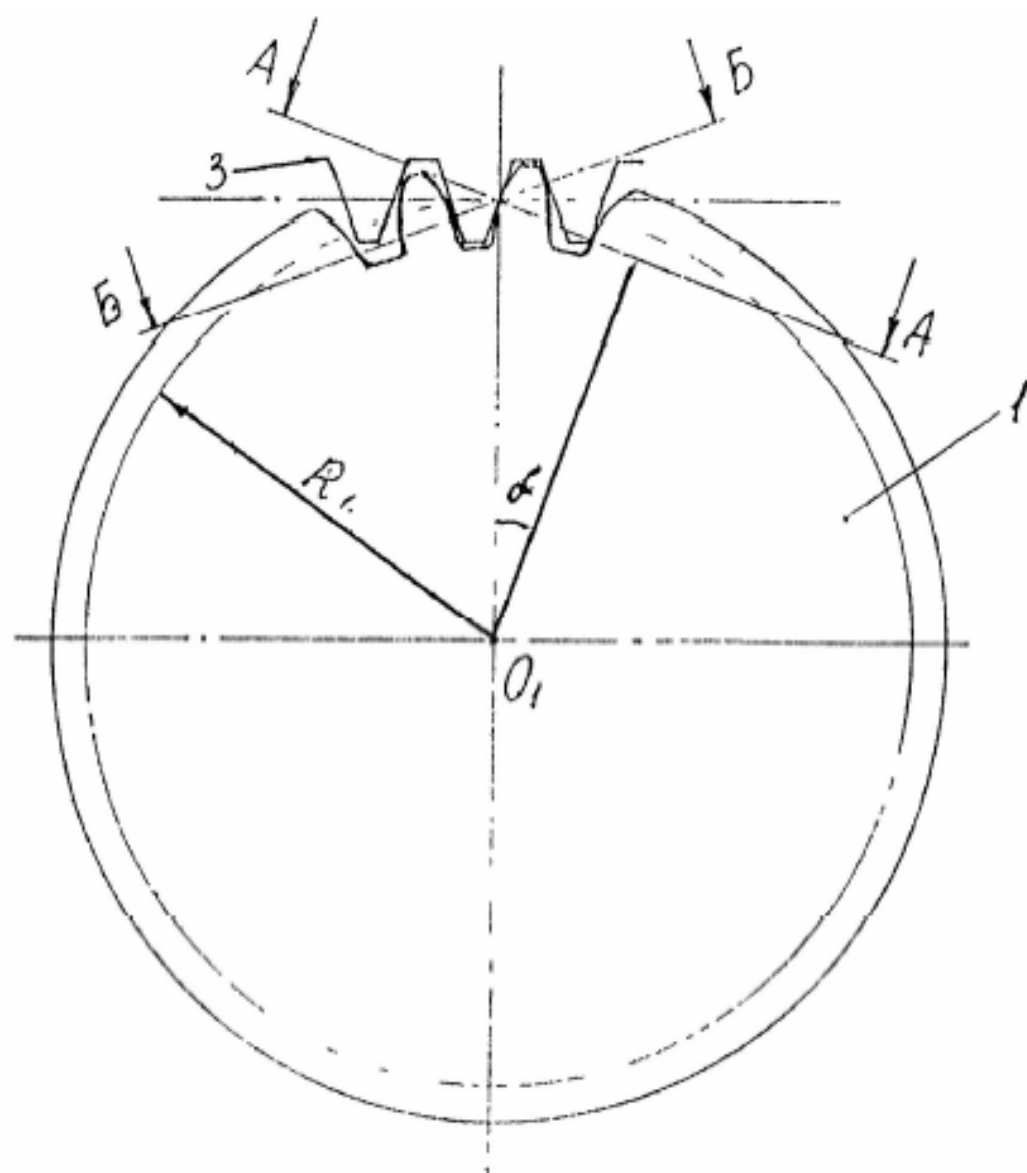
$$k = l = R_w \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta}$$

Следовательно,

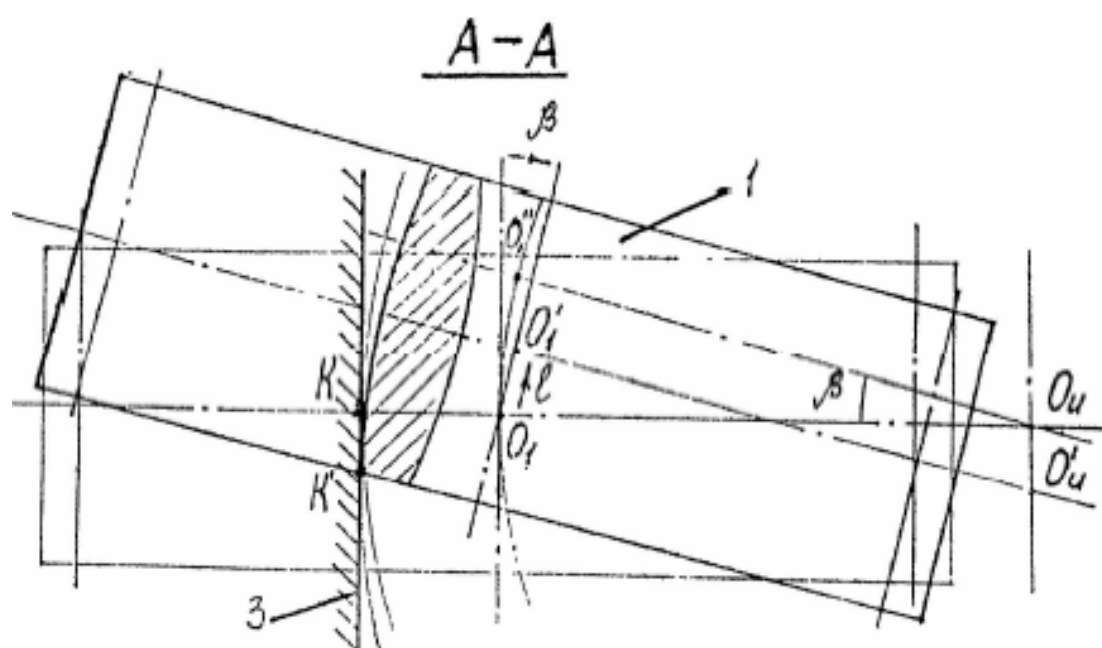
Передача работает следующим образом.

Если отсутствует перекос осей ведущее колесо 1 контактирует с ведомым колесом 2 по линии LKP (фиг.4). В реальных условиях при перекосе осей на угол β , под действием осевой составляющей передаваемого усилия центр ведущего колеса перемещается вдоль своей оси из точки O_1 в точку O'_1 , а центр ведомого колеса - из точки O_2 в точку O'_2 и контактирование осуществляется по линии $L'K'P'$. Также возможно применение специальных устройств для установки требуемых положений колес на своих осях.

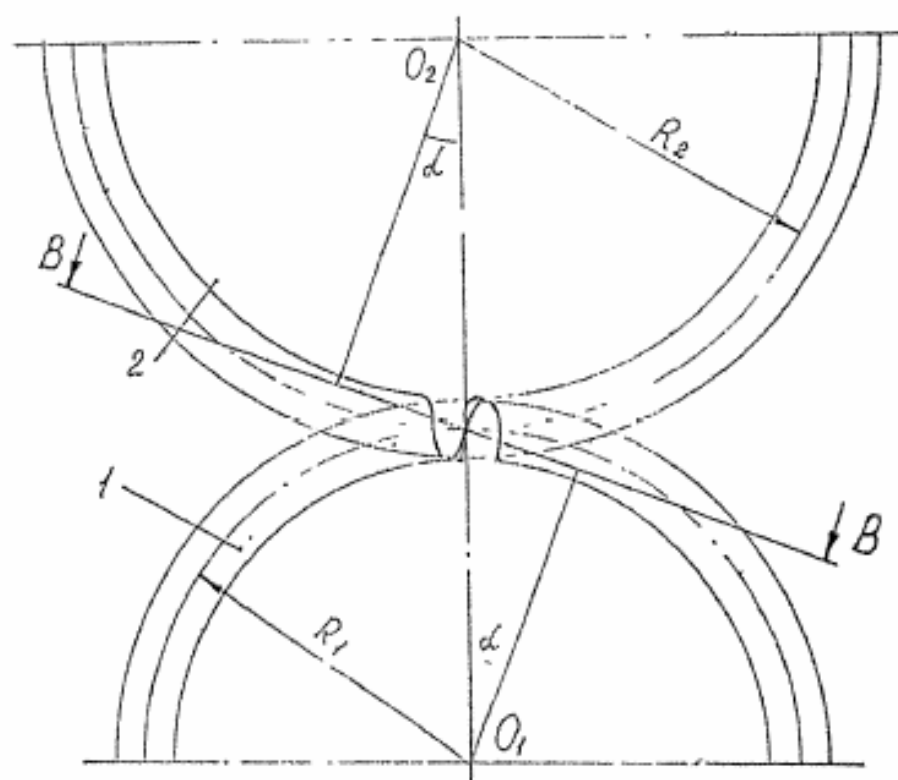
Таким образом, передача имеет максимально возможную площадку мгновенного контакта вдоль контактируемых зубьев при перекосе осей колес, что способствует распределению передаваемого усилия по длине зуба и, тем самым, повышению нагрузочной способности передачи. Передача сохраняет постоянное передаточное отношение, т.к. это учитывается в процессе формообразования зубьев. Это снижает вибрацию и неблагоприятные динамические явления. В технологическом плане изготовление зубчатых колес передачи можно осуществлять известными высокопроизводительными способами, т.к. при нарезании ведущего колеса заготовки, а при нарезании ведомого колеса инструмент совершают простые поступательные и вращательные движения и не требуется переустановки заготовки или инструмента.



1
Фиг. 1

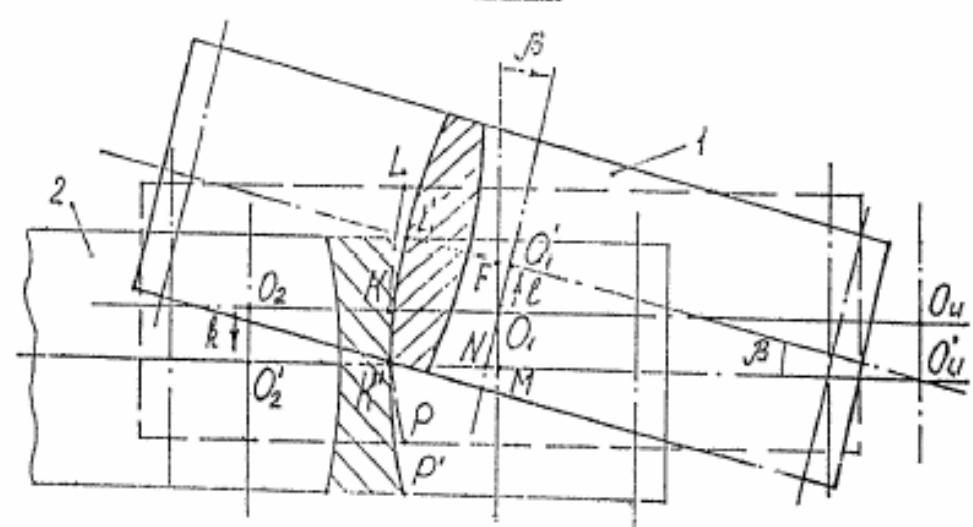


Фиг. 2



Фиг. 3

B-B



Фиг. 4



УКРАЇНА

(19) UA (11) 29761 (13) A

(51) 6 B23F1/00, 21/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВиданий під
відповідальністю
власника
патенту(54) СПОСІБ НАРІЗУВАННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛІС З ДВОГНУТИМИ ЗУБ'ЯМИ ТА ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЙОГО
ЗДІЙСНЕННЯ

(21) 97052444

(22) 27.05.1997

(24) 15.11.2000

(33) UA

(46) 15.11.2000, Бюл. № 6, 2000 р.

(72) Воронцов Борис Сергійович

(73) СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІ-
ВЕРСИТЕТ

(57) 1. Способ нарезания зубчатых колес с двояковогнутыми зубьями, который осуществляют методом обката, отличающийся тем, что для его осуществления применяют специальный инструмент, обрабатывающий обе поверхности двояковогнутых зубьев с одной установки, причем кроме движения обката заготовка и инструмент совершают согласованные встречные перемещения

вдоль своих осей, а ось инструмента при этом поворачивают на заданный угол.

2. Инструмент для нарезания зубчатых колес с двояковогнутыми зубьями, имеющий криволинейную форму производящей поверхности в продольном направлении, отличающийся тем, что его производящая поверхность соответствует сопряженному зубчатому колесу с двояковыпуклыми зубьями, боковая поверхность зубьев которого представляет собой двухпараметрическую огибающую инструментальной поверхности реечного типа, причем первый параметр огибания определяет постоянное передаточное отношение станочного зацепления, а второй обеспечивает, чтобы образующая по длине боковой поверхности зуба представляла собой дугу окружности заданного радиуса в заданной плоскости.

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано при изготовлении зубчатых колес тяжело нагруженных передач, работающих при перекосах осей, вызванных погрешностями изготовления и монтажа, износом и деформацией колес, валов и подшипниковых узлов.

Известен способ нарезания зубчатого колеса с зубьями, модифицированными по длине (см. а. с. СССР № 1779493, МКИ B23F9/06, 1992) методом обката с возможностью получения двояковогнутых зубьев.

Недостатком данного способа является ограниченность технологических возможностей получения двояковогнутых зубьев различной продольной модификации.

Известен способ нарезания зубчатых колес с двояковогнутыми зубьями (см. а. с. СССР № 329966, МКИ B23F1/06, 1972 - прототип) методом обката.

Недостатком данного способа является низкая производительность, связанная с переустановкой инструмента или заготовки при нарезании противоположной стороны зубьев.

В основу предложенного изобретения поставлены задачи и расширения технологических возможностей способа нарезания зубчатых колес с двояковогнутыми зубьями методом обката за счет получения двояковогнутых зубьев различной про-

дольной модификации, а также повышение производительности зубообработки за счет сокращения вспомогательного времени.

Согласно изобретению задачи достигаются тем, что производящая поверхность специального инструмента соответствует сопряженному колесу с двояковыпуклыми зубьями, боковая поверхность зубьев которого представляет собой двухпараметрическую огибающую инструментальной поверхности реечного типа, причем первый параметр огибания определяет постоянное передаточное отношение станочного зацепления, а второй - согласованное перемещение колеса вдоль своей оси, и поворот этой оси таким образом, чтобы образующая по длине боковой поверхности зуба представляла собой дугу окружности заданного радиуса в заданной плоскости.

В процессе зубообработки обе поверхности двояковогнутых зубьев обрабатываются с одной установкой инструмента и заготовки, причем, кроме движения обката, заготовка и инструмент совершают согласованные встречные перемещения вдоль своих осей, а ось инструмента при этом поворачивается на угол, соответствующий углу перекоса осей в реальной передаче.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг. 1 показано формообразование производящей поверхности специального инстру-

(19) UA (11) 29761 (13) A

мента, а на фиг. 2 - процесс нарезания двояковогнутых зубьев.

Боковая поверхность специального инструмента для нарезания зубчатых колес с двояковогнутыми зубьями 1 (фиг. 1) получается как двухпараметрическая огибающая поверхности рейки 2 при относительном движении, причем первый параметр определяет передаточное отношение станочного зацепления рейки и инструмента, а второй параметр устанавливает зависимость угла поворота β оси инструмента в плоскости А-А, проходящей через линию зацепления и величины перемещения $t=O_1O_1'$ инструмента вдоль своей оси таким образом, чтобы в нормальном сечении плоскостью А-А линия производящей поверхности инструмента представляла собой заданную дугу. При этом производящая поверхность инструмента будет соответствовать боковой поверхности зубчатого колеса с двояковыпуклыми зубьями, нарезаемого аналогичным способом. Таким способом изготавливается шлифовальный инструмент. Для изготовления режущего инструмента необходимо, после получения боковой двояковыпуклой поверхности, нарезать стружечные канавки.

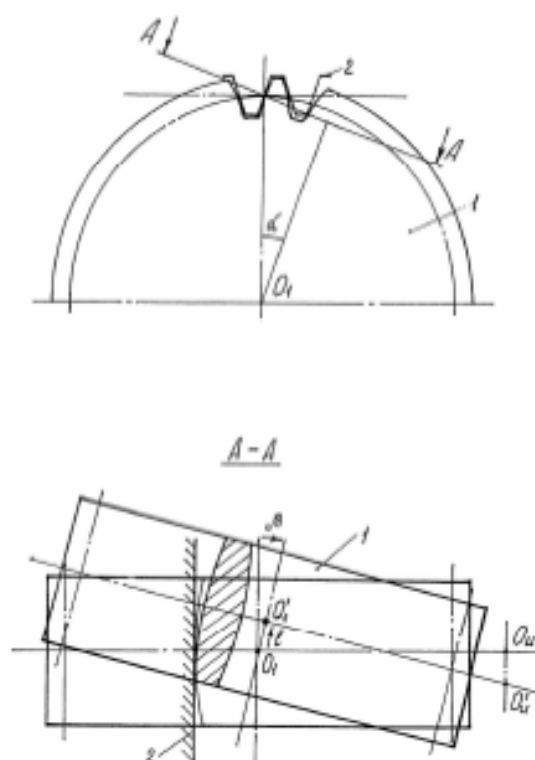
На фиг. 2 показан процесс нарезания зубчатого колеса 3 с двояковогнутыми зубьями методом обката. Если боковая поверхность зуба инструмента 1 в нормальном продольном сечении представляет собой дугу окружности радиуса R_u , то для получения такой же дуги на сопряженном двояковогнутом зубе нарезаемого колеса необходимо, чтобы в процессе обработки при повороте оси инструмента на угол β инструмент и заготовка перемещались вдоль своих осей во встречном направлении на величину $t=O_1O_1'=O_2O_2'=O_1M=O_1'O_1'$.

При этом центр дуги окружности сместится из точки O_u в точку O_u' . Такую же дугу можно было бы получить, вращая инструмент вокруг точки O_u , но практически осуществить это гораздо сложнее.

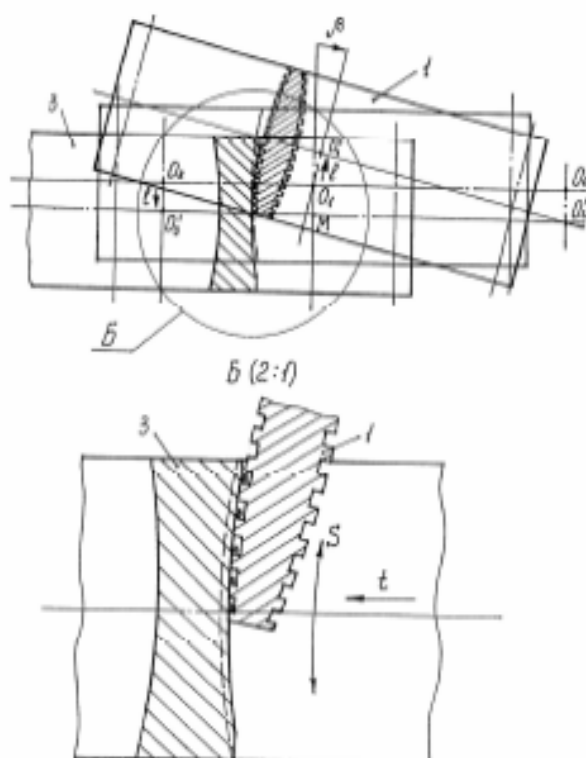
Способ осуществляется следующим образом.

Черновую обработку зубчатого колеса осуществляют традиционными способами на зубофрезерных или зубодолбежных станках стандартным инструментом. Чистовую обработку осуществляют специальным инструментом, производящая поверхность которого соответствует двояковыпуклой поверхности сопряженного зубчатого колеса передачи. При этом, кроме движения обката, заготовка и инструмент совершают встречные движения резания вдоль своих осей, зависящие от угла поворота оси инструмента таким образом, чтобы образующая вдоль двояковогнутого зуба представляла собой заданную кривую. В относительном движении это соответствует дуговой подаче S при глубине резания t (фиг. 2).

Таким образом, способ позволяет получить двояковогнутые зубья колеса различной продольной модификации, что способствует повышению нагрузочной способности передачи при перекосе осей колес за счет увеличения площади мгновенного контакта вдоль линии зуба. Способ обладает высокой производительностью за счет сокращения вспомогательного времени на переустановку инструмента, легко осуществим, т. к. заготовка и инструмент совершают простые поступательные и вращательные движения, а изготовление специального инструмента легко осуществимо.



Фиг. 1



Фиг. 2

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
 Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
 (044) 295-81-42, 295-81-97

Підписано до друку _____ 2002 р. Формат 60x84 1/8.
 Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 35 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
 (044) 268-25-22



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **68546** (13) **U**
(51) МПК (2012.01)
B23F 9/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2011 11822</p> <p>(22) Дата подання заявки: 07.10.2011</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 26.03.2012</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.03.2012, Бюл.№ 6</p>	<p>(72) Винахідник(и): Вітренко Олексій Володимирович (UA), Воронцов Борис Сергійович (UA), Кириченко Сергій Геннадійович (UA), Кузнецова Марина Миколаївна (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Вітренко Олексій Володимирович, вул. Академгородок, 14, м. Луганськ, 91051 (UA), Воронцов Борис Сергійович, кв. Якіра, 1, кв. 300, м. Луганськ, 91051 (UA), Кириченко Сергій Геннадійович, вул. Фестивальна, 1а, м. Луганськ, 91034 (UA), Кузнецова Марина Миколаївна, кв. Шевченка, 48, кв. 15, м. Луганськ, 91033 (UA)</p>
---	---

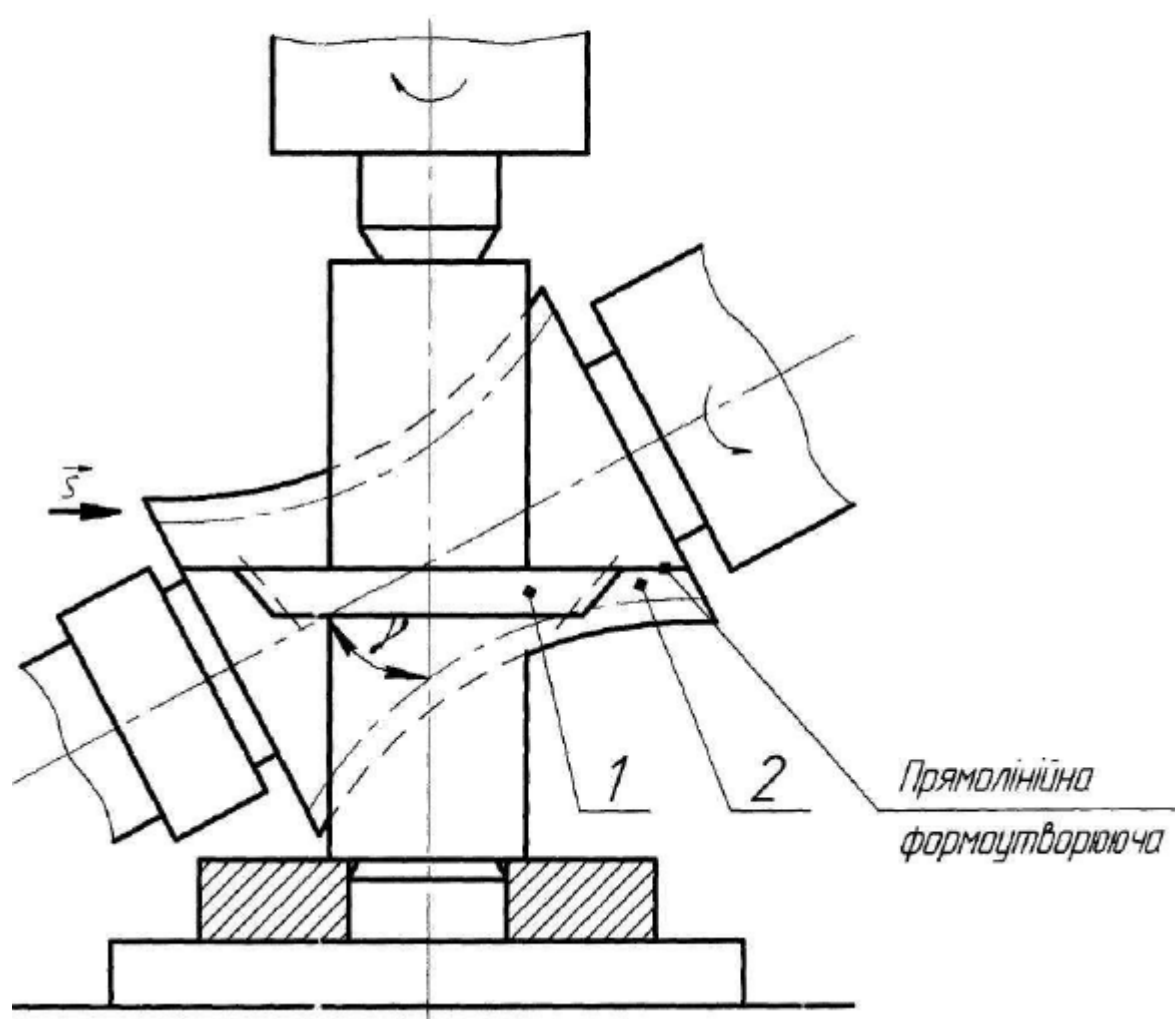
(54) СПОСІБ НАРІЗУВАННЯ ГІПЕРБОЛОЇДНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА ІНСТРУМЕНТІВ

(57) Реферат:

Спосіб нарізування гіперboloїдних зубчастих коліс для гіперboloїдної передачі, коли осі заготовки та інструмента схрещено, а кутові швидкості обернено пропорційні кількості їх зубців, нарізування виконують прямозубим довбачем на заготовці, виконаній у вигляді односмугового гіперboloїда, а нарізування виконують подачею вздовж прямолінійної формоутворюючої односмугового гіперboloїда.

UA 68546 U

UA 68546 U



UA 68546 U

Корисна модель належить до галузі металообробки і може бути використана у машинобудуванні та інших галузях промисловості для нарізування зубців гіперболоїдних зубчастих коліс та інструментів.

Відомо спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс для гіперболоїдної передачі, який полягає в тому, що осі заготовки та інструмента схрещено, кутові швидкості обернено пропорційні кількості їх зубців, нарізування зубців виконують прямозубим довбачем на заготовці, виконаній у вигляді односмугового гіперболоїда, який рухається вздовж своєї осі [див. а. с. СРСР № 536902, МПК2 В23F9/04, опубл. 30.11.1976, бюл. №44].

Цей спосіб вибрано за прототип.

Недоліком відомого способу є те, що нарізуване зубчасте колесо для гіперболоїдної передачі має таку форму, що може зчіплюватися тільки з циліндричним колесом, діаметр котрого та кількість зубців рівні діаметру та кількості зубців довбача.

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалення способу нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс шляхом того, що одержують таку геометрію зубчастого колеса для гіперболоїдної передачі, котре може зчіплюватися з циліндричним колесом будь-якого діаметра з різною кількістю зубців.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс для гіперболоїдної передачі, коли осі заготовки та інструмента схрещено, а кутові швидкості обернено пропорційні кількості їх зубців, нарізування виконують прямозубим довбачем на заготовці виконаній у вигляді односмугового гіперболоїда, згідно з корисною моделлю, нарізування виконують подачею вздовж прямолінійної формоутворюючої односмугового гіперболоїда. Це дозволить одержувати рух, аналогічний руху зубчастої рейки, тобто отримувати обкатування гіперболоїдного колеса довбачем нескінченно великого діаметра, що дасть можливість одержати гіперболоїдне колесо з принципово новою геометрією зуба.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де зображено пристрій для реалізації запропонованого способу, що містить прямозубий довбач 1, гіперболоїдне колесо 2.

Спосіб здійснюється наступним чином. На столі зубофрезерного верстата на оправці встановлюють прямозубий довбач 1. На інструментальному супорті верстата встановлюють заготовку нарізаного гіперболоїдного колеса 2. Вісь інструментального супорта повернуто на кут γ відносно до осі столу верстата. Стіл верстата та інструментальний супорт обертають з кутовими швидкостями обернено пропорційно кількості зубців довбача 1 та нарізаного гіперболоїдного зубчастого колеса 2. Довбач рухають з подачею S вздовж прямолінійної формоутворюючої односмугового гіперболоїда.

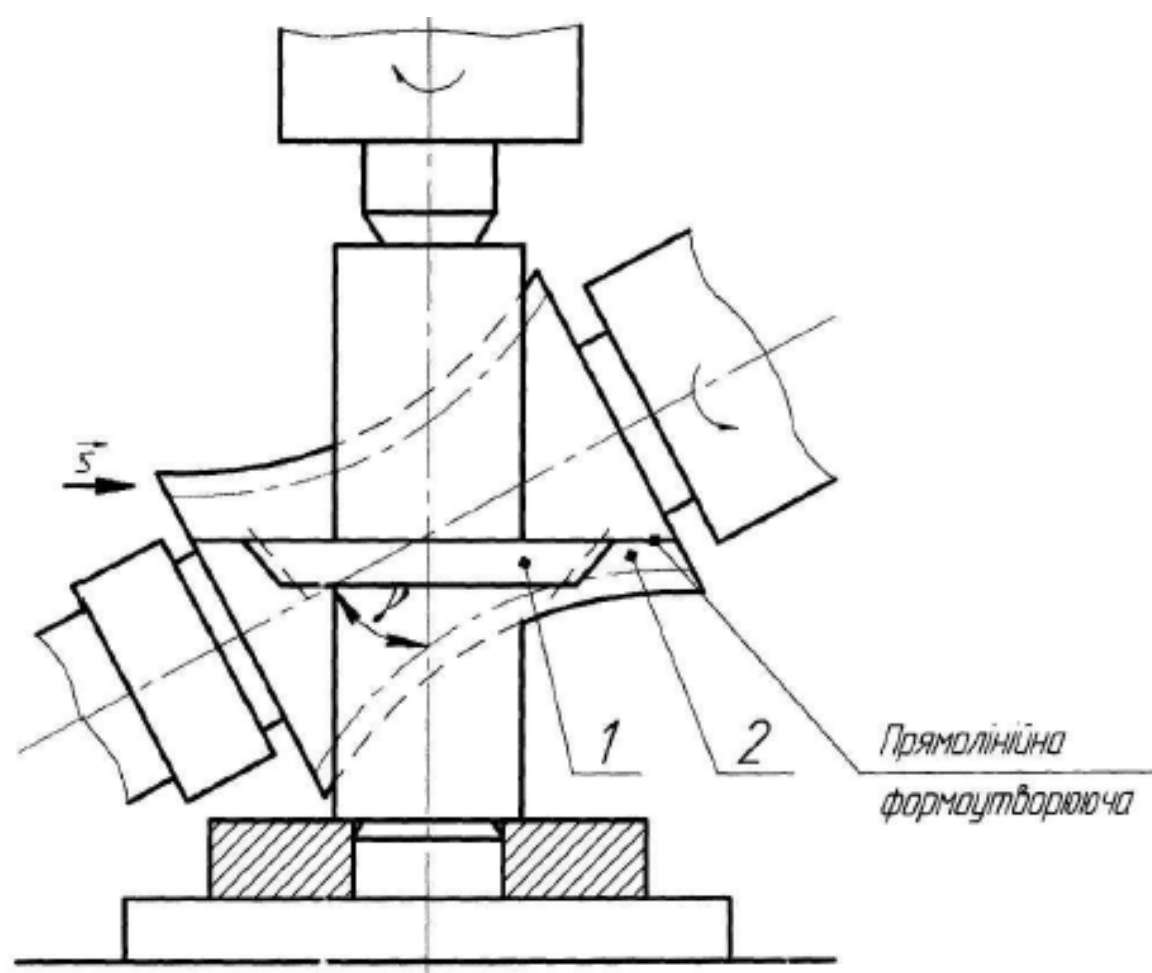
Переваги технічного рішення, що заявляється:

- одержують гіперболоїдне зубчасте колесо з принципово новою геометрією зуба;
- підвищують продуктивність виготовлення зубчастих коліс;
- підвищують якість виготовлення гіперболоїдного колеса;
- одержують можливість зчіплювання одного гіперболоїдного колеса з різними

циліндричними зубчастими колесами.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс для гіперболоїдної передачі, коли осі заготовки та інструмента схрещено, а кутові швидкості обернено пропорційні кількості їх зубців, нарізування виконують прямозубим довбачем на заготовці, виконаній у вигляді односмугового гіперболоїда, який відрізняється тим, що нарізування виконують подачею вздовж прямолінійної формоутворюючої односмугового гіперболоїда.



Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток Д

Документація про практичне використання та впровадження основних
результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з виробництва
Державного підприємства «Львівський
державний завод «ЛОРТА»

В.С.Мойсин

«12» 04 2017 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи

Воронцова Бориса Сергійовича на тему:

«Системи та процеси формоутворення складних поверхонь»

Комісія у складі: голова – головний технолог Франт П.М.; члени комісії: головний конструктор – Ковальчук Б.І., начальник механічного цеху №001 Ярko О.Я., інженер-технолог механічного цеху №001 Тимошиk О.В., склали цей акт про те, що практичні результати дисертаційної роботи Воронцова Бориса Сергійовича «Системи та процеси формоутворення складних поверхонь» впроваджені у виробничий процес ДП ЛОРТА в наступному вигляді:

1. Програмне забезпечення для синтезу та аналізу складних поверхонь, застосування якого для деталей спеціального призначення дозволило аналізувати їх зношування та вирішувати задачі формоутворення. Дане програмне забезпечення передано автором для потреб ДП ЛОРТА безоплатно. Перевагою використання даного забезпечення стало скорочення витрат нормо-годин на технологічне проектування на 25% - 30 %.
2. Методика інтерактивного синтезу та програмне забезпечення процесу формоутворення складних поверхонь з наступним візуальним аналізом їх геометро-кінематичних показників, які характеризують властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

Використання зазначених результатів дозволяє: підвищити якість технологічного проектування та ефективність роботи відділу головного технолога; підвищити продуктивність праці при операціях механічного оброблення в середньому на 12% .

Даний акт не є основою для взаємних фінансових розрахунків між НТУУ „КПІ” та ДП ЛОРТА.

Голова комісії

П.Франт

Члени комісії:

Б.Ковальчук

О.Ярко

О.Тимошиk

А К Т

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Воронцова Бориса Сергійовича на тему:

«Системи та процеси формоутворення складних поверхонь»

Матеріали та результати дисертаційної роботи к.т.н., доцента Воронцова Бориса Сергійовича на тему «Системи та процеси формоутворення складних поверхонь», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти використані в діяльності конструкторсько-технологічного відділу ТОВ «НДІ «Редуктор» шляхом впровадження:

1. Комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125, що призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн.

2. Удосконалення зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс дозволив знизити витрати на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн.

Сумарний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Воронцова Б.С. склав 236 тис. грн.



В.М. Власенко

В.М. Фей



Затверджую
Директор ТОВ «НДІ «Редуктор»
В.М. Власенко
04 2017 р.

**економічної ефективності впровадження результатів
дисертаційної роботи Воронцова Бориса Сергійовича
на тему «Системи та процеси формоутворення складних поверхонь»**

Забезпечення якості зубчастих коліс та скорочення термінів конструкторсько-технологічного підготовки їх виробництва досягнуто за рахунок використання нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Розрахунок економічної ефективності було здійснено для механічних приводів загально машинобудівного використання (ГОСТ 25484-93, ДСТУ 2279-93). Річний випуск планетарних мотор-редукторів: 6МП-25–6МП-125 складає близько 8 тис. виробів на рік на суму біля 200 млн. грн.

Сумарний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Воронцова Б.С. склався з наступних частин:

1. Економічний ефект від впровадження в розробку конструкторської документації.

Впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи дозволило автоматизувати процес проектування і скоротити строки розробки на 10%-15%. Загальний обсяг кошторису на розробку конструкторської документації для планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125 складає біля 150 тис. грн. Тому економічний ефект від впровадження системи:

$$E_k = 150 \cdot (0,10 \div 0,15) = 15 \div 22,5 \approx 20 \text{ тис. грн.}$$

2. Економічний ефект від впровадження у виробництво.

Витрати на виготовлення деталей та складання планетарних мотор-редукторів складають близько 45% від загальної суми, що дорівнює біля 90 млн. грн. Витрати на зубообробку дорівнюють близько 30% від цієї суми, або 27 млн. грн. з яких витрати на зубооброблювальний інструмент складають близько 2,7 млн. грн. (10%).

Впровадження удосконалених інструментів типа «однопорожнинний гіперболоїд» з покращеними геометричними та кінематичними показниками та зниженою собівартістю виготовлення за рахунок виключення операції затилування дозволив знизити затрати на зубооброблювальний інструмент на 8%. Тому економічний ефект від впровадження інструменту:

$$E_i = 2700 \cdot 0,08 = 216 \text{ тис. грн.}$$

Таким чином, річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Воронцова Б.С. для планетарних мотор-редукторів 6МП-25–6МП-125 склав:

$$E = E_k + E_i = 20 + 216 = 236 \text{ тис. грн.}$$

Головний інженер

В.М. Фей



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Воронцова Б.С.

«Системи та процеси формоутворення складних поверхонь»

Комісія в складі: голова – декан факультету інженерії Кудрявцев С.О. та члени: д.т.н., проф., завідувач кафедри МОПІ Архипов О.Г., к.т.н., доц. кафедри МОПІ Жидков А.Б. склали цей акт про те, що матеріали та результати дисертаційної роботи к.т.н. доцента Воронцова Бориса Сергійовича на тему «Системи та процеси формоутворення складних поверхонь», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – «процеси механічної обробки, верстати та інструменти» впроваджені у навчальний процес СНУ ім. В. Даля при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю «прикладна механіка» і використовуються при викладанні дисципліни «Технологія обробки типових деталей і складання машин», зокрема при проведенні практичних занять використовуються методика та програмне забезпечення інтерактивного синтезу складних поверхонь.

Голова комісії

к.т.н., доц.

Кудрявцев С.О.

Члени комісії:

д.т.н., проф.

Архипов О.Г.

к.т.н., доц.

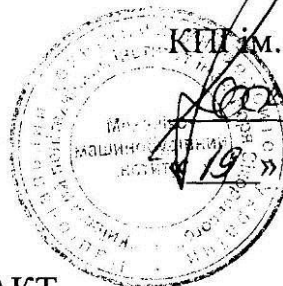
Жидков А.Б.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор механіко –
машинобудівного інституту

КНІ ім. Ігоря Сікорського

М.І. Бобир



19

04

2017р.

АКТ

впровадження результатів наукової роботи Б.С. Воронцова
представленої на здобуття наукового ступеню доктор технічних наук

Ми, що нижче підписались: зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування, д.т.н., проф. В.А. Пасічник, заступник директора ММІ з науково-методичної роботи д.т.н. О.А. Охріменко склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Воронцова Бориса Сергійовича на тему «Системи та процеси формоутворення складних поверхонь», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – «процеси механічної обробки, верстати та інструменти» впроваджені в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за спеціальністю «галузеве машинобудування», а саме, створені нові розділи для дисципліни «Теорія формоутворення спеціальних поверхонь» розроблено новий розділ «Комп'ютерна інтеграція систем та процесів формоутворення складних поверхонь», для дисципліни «Інструментальне та технологічне забезпечення процесів формоутворення» розроблено новий розділ «Підвищення ефективності процесу формоутворення на основі синтезу теорії поверхонь та теорії формоутворення».

Зав. кафедри інтегрованих
технологій машинобудування

В.А. Пасічник

Заступник директора ММІ
з науково-методичної роботи

О.А. Охріменко

Додаток Е

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып.8. – С.170 – 173. (запропоновано алгоритм і отримані твердотільні моделі колеса і шестерні тягової передачі, які мають різну геометрію поверхонь зубців).
2. Воронцов Б.С. Создание трехмерных твердотельных моделей тяжело нагруженных колес с бочкообразными зубьями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №9 (67). – С.231 – 235. (розроблено прикладну бібліотеку, яка дозволяє автоматизувати процес створення твердотільних моделей зубчастих коліс з бочкоподібними зубцями по перетинах).
3. Воронцов Б.С. Концептуальные вопросы интеграции конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №11(69). – С.194 – 198. (розроблено алгоритм інтеграції конструкторських і технологічних систем автоматизованого проектування).
4. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А.Кириченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2005. – №7 (89) – С. 34 – 36. (розроблено механізм оперативного управління геометрією передач в інтерактивному режимі).
5. Дорошенко Ю.О. Політканинні перетворення у конструюванні профілю вихідного контуру зуборізного інструменту / Ю.О. Дорошенко,

І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.11. – С. 68 – 74. (отримано аналітичні залежності для управління геометрією профілю зуборізного інструменту з використанням апарату політканевих перетворень).

6. Воронцов Б.С. Моделирование гиперболоидных инструментов с использованием CAD – систем / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, И.А. Бочарова, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 318 – 323. (запропоновано алгоритм твердотілого моделювання гіперболоїдних інструментів для виготовлення різних типорозмірів циліндричних зубчастих коліс).

7. Бочарова І.А. Модифікація твірної поверхні з використанням кривої Безьє третього порядку / І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 4, т.30.– С. 116 – 120. (запропоновано методику здійснення геометричної модифікації твірної поверхні з використанням кривих Безьє третього порядку).

8. Воронцов Б.С. Допоміжні ділянки вихідного контуру зубчастих коліс / Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.13. – С. 179 – 185. (отримані математичні залежності, які дозволяють забезпечити автоматичну побудову допоміжних ділянок вихідного контуру зубчастих коліс).

9. Бочарова И.А. Зуботочение цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 30. – С.32 – 36. (отримано комп'ютерні моделі інструментів, задні поверхні яких не мають затилування).

10. Воронцов Б.С. Интерактивное управление синтезом зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вестник национального технического

университета «ХПИ»: сб. науч. трудов. Тематический выпуск «Проблемы механического привода». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – №40. – С. 182 – 187.

11. Воронцов Б.С. Компьютерное управление геометрией зубьев зубчатых колес и зуборезных инструментов / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну: міжвід. наук.– техн. збірник. – К.: ДОП КНУТД, 2005. – С.184 – 189. (отримано аналітичні залежності, що описують твірну поверхню і визначають відповідні їй геометро-кінематичні показники).

12. Воронцов Б.С. Производящая поверхность реечного типа с изменяемой продольной формой зуба / Б.С. Воронцов, Т.Н. Чаплинская // Системні технології: Регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 2 (43). – С.53 – 56. (розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє управляти поздовжньої лінією зубців при синтезі циліндричних передач з арковими і двоопукло-увігнутими зубцями).

13. Воронцов Б.С. Гиперболоидные инструменты для изготовления цилиндрических колес с произвольным профилем зуба / Б.С.Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – Вип. 19. – С.76 – 81.

14. Воронцов Б.С. Взаємообвідні поверхні циліндричних передач з круговою лінією зубців / Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип. 4, т. 33. – С. 130 – 135. (розроблено математичний апарат і комп'ютерну програму для зміни поздовжньої форми зубців за допомогою керуючих елементів).

15. Воронцов Б.С. Гиперболоидные передачи с управляемым исходным контуром производящего колеса / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПИ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПИ», 2006 – №22. – С. 56 – 60.

16. Воронцов Б.С. Визуальный динамический синтез сопряженных поверхностей / Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2006. – Вип.15. – С. 107– 113.

17. Витренко В.А. Технологические особенности изготовления гиперболоидного инструмента для финишной обработки зубчатых колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, А.В. Лейба, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 32. – С.64 – 68. (отримано профіль гіперболоїдного багатозахідного шліфувального круга, що описується за допомогою циліндричного зубчастого колеса в просторовому верстатному зачепленні).

18. Воронцов Б.С. Профилирование зубьев производящего колеса на основе геометрических преобразований / Б.С.Воронцов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля.– Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – №3 (97). – С. 31 – 36.

19. Воронцов Б.С. Компьютерное формообразование твердотельных моделей гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С.298 – 302.

20. Воронцов Б.С. Особенности твердотельного компьютерного моделирования гиперболоидных передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №21. – С. 249 – 254.

21. Витренко В.А. Технологические особенности проектирования и изготовления гиперболоидных колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 34. – С.47 – 53. (отримано конструктивні параметри гіперболоїдних коліс і спроектованих на їх базі інструментів).

22. Воронцов Б.С. Автоматизированная система синтеза передач

зацеплением / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С.133 – 138. (розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати апроксимацію таблично представлених кривих, що описують вихідні контури).

23. Воронцов Б.С. Унификация геометрии рабочих поверхностей зубьев при синтезе передач зацеплением / Б.С.Воронцов, И.А.Бочарова, Д.А.Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2008. – №29. – С. 24 – 28. (виконано аналіз комп'ютерно-графічного і аналітичного способів апроксимації таблично представлених профілів кривими Безьє третього порядку).

24. Воронцов Б.С. Единая информационная модель конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць. – Луганськ: СЛУ ім. В.Даля, 2008. – С.139 – 142. (проаналізовано можливості сучасних систем автоматизованого проектування при моделюванні складних поверхонь деталей).

25. Воронцов Б.С. Повышение эффективности единичного производства сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С. 227 – 231. (запропоновано спосіб отримання, аналізу та вдосконалення твердотільних комп'ютерних моделей деталей зі складною геометрією).

26. Воронцов Б.С. Синтез и изготовление сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2009. –

№20. – С. 54 – 59. (розроблено програмне забезпечення для синтезу складнопрофільних зубчастих коліс з поліпшеними експлуатаційними властивостями).

27. Бочарова И.А. Накатка зубьев цилиндрических колес методом ПДУ / И.А. Бочарова, О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Вестник двигателестроения: научно– технич. журнал. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – №2. – С. 102 – 105. (отримано оптимальні параметри накатного інструменту і визначена його конструкція).

28. Бочарова И.А. Особенности формообразования зубчатых колес для гиперboloидных передач / И.А. Бочарова, А.В. Витренко, Б.С. Воронцов// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 50 – 53. (розроблено алгоритм поверхневого і твердотільного комп'ютерного моделювання передач з осями, що схрещуються).

29. Воронцов Б.С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №27. – С. 49 – 54.

30. Воронцов Б. С. Анализ условий контактирования гиперboloидного инструмента и изготавливаемого колеса в системе PowerSHEPE / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С. 291 – 298.

31. Витренко В.А. Поверхностное моделирование гиперboloидных инструментов в сиситеме PowerSHAPE / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №29. – С. 30 – 35. (розроблено алгоритм і методику поверхневого моделювання зубців гіперboloїдна інструменту).

32. Витренко В.А. Формообразование зубьев многозаходных зубообрабатывающих инструментов / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова, В.В. Черновол // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – Вип. 713. – С.3 – 6. (розроблено принципово нову схему формоутворення гіперболоїдних зуборізних фрез і долбиків).

33. Витренко О.С. Исследование процесса формообразования гиперболоидных зубчатых колес при помощи инструментального зубчатого колеса / О.С. Витренко, И.А. Кириченко, Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С. 188 – 194. (розроблено ряд нових схем формоутворення гіперболоїдних зубчастих коліс з різним кутом нахилу зубців і збільшеним коефіцієнтом перекриття).

34. Воронцов Б.С. Использование унифицированных параметров при автоматизации проектирования зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2012. – Вип. 746. – С.180 – 185.

35. Витренко О.С. Накатка зубьев зубчатых колес при помощи гиперболоидных накатников / О.С. Витренко, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 203 – 208. (проведено дослідження профілю зубців, які отримані за допомогою гіперболоїдних накатників).

36. Вітренко В.О. Профілювання зубооброблювального обкатного інструменту / В.О. Вітренко, Б.С. Воронцов, І.А.Бочарова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та

приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – Вип. 772. – С.56 – 59. (отримані у теоретичному вигляді та обґрунтовані гіперболоїдні обкатні інструменти, які одержані за допомогою інструментальної поверхні, що повністю співпадає з поверхнею формоутворюючого зубчастого колеса).

37. Воронцов Б. С. Компьютерная интеграция систем и процессов формообразования при механической обработке / Б.С. Воронцов, В.А. Пасечник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 17 – 23. (розроблено принципово нові принципи комп'ютерної інтеграції систем формоутворення зубчастих коліс)

38. Vitrenko V.A. Rolling of teeth of cylindrical teeth– wheels / V.A. Vitrenko, B.S. Vorontsov, I.A Kirichenko // Les technologies modernes de l'industrie mecanique et les problemes de la formation des cadres d'ingenieurs. – Mahdia (Tunisie) UNTD, 2008. – P. 77 – 80. (отримано математичні залежності для моделювання та аналізу накатного інструменту) (іноземне видання).

39. Воронцов Б.С. Современные проблемы оптимизации передач со скрещающимися осями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, А.Б. Воронцов // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып.107. – С. 41 – 44. (розроблено математичне забезпечення та запропонована методика синтезу передач з осями, що схрещуються) (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

40. Витренко В.А. Особенности изготовления зуборезных долбяков / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. - Вып.117. – С. 27 – 31. (запропоновано нову геометрію зуборізних долбяків, основна інструментальна поверхня яких базується на тілі типу «однополостний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

41. Воронцов Б.С. Совершенствование кинематических схем

формообرازования зубообработывающего инструмента / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вып.129. – С. 40 – 45. (зроблено аналіз четвертого типу кінематичної схеми формоутворення третього класу, в основі якого лежить взаємодія оксидов циліндра і тіла, типу «однополостний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

42. Витренко О.С. Вопросы формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №36. – С. 25 – 28. (розроблено принципово нову гвинтову зубчасту передачу з лінійним контактом зубців і передаточним відношенням менше восьми) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

43. Vitrenko A.V. Vytvorenie tvare hyperboloidu šípových ozubených kolies s lineárnou povahou zubov dotyk / A.V. Vitrenko, B.S. Vorontsov, M. Boshanski // Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2013 pri príležitosti 44. výročia založenia Technickej fakulty SPU v Nitre a 20. Medzinárodného stojárskeho veľtrhu v Nitre: zborník vedeckých prac. – Nitra (Slovensko), 2013. – С. 64 – 68. (зроблено аналіз п'яти контакту циліндро-гіперболоїдних зубчастих передач з різним числом зубів) (іноземне видання).

44. Витренко В.А. Разработка технологии изготовления винтовых зубчатых колес на универсальном оборудовании / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Н. Семьянистая // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вып.139. – С. 33 – 37. (розроблено методику виготовлення зубців на заготовці, типу «однополостний гіперболоїд обертання») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

РАН).

45. Витренко В.А. Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, И.А. Бочарова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №41. – С. 27 – 31. (розроблено математичне забезпечення процесу формоутворення гвинтових зубчастих коліс на стандартному універсальному обладнанні з ЧПУ за допомогою кінцевих фрез) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

46. Антонюк В.Е. Модификация зубчатых зацеплений как средство повышения показателей качества и нагрузочной способности зубчатых передач / В.Е. Антонюк, Б.С. Воронцов, В.Е. Старжинский, В.А. Белый, В.В. Супин // Теория и практика зубчатых передач. – Ижевск (Россия): ИжГТУ, 2014. – С. 285– 301. (розроблено програму автоматизованого розрахунку, що дозволяє здійснювати багатокритерійний інтерактивний синтез передач зачепленням) (іноземне видання).

47. Кривошея А.В. Разработка концепции, структуры и принципов создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач / А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, Н.Э. Тернюк, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – №34(1143). – С. 64 – 74. (розроблено концепцію, структуру і принципи створення і функціонування нової технічної системи синтезу зубчастих зачеплень) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

48. Воронцов Б.С. Совершенствование математических моделей задания и теоретического формообразования зубчатых передач с использованием глобальной сплайн-интерполяции / Б.С. Воронцов, А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, Т. Е. Третьяк // Вісник Національного

Технічного університету "ХП": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №25 (1247). – С. 19 – 24. (отримано математичні залежності для узагальненого опису повного профілю зубчастих коліс) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

49. Пат. №25543А. Україна, МКИ F16Н1/08. Зубчата передача / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97041926; заявл. 22.04.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

50. Пат. №25541А. Україна, МКИ В23F1/00. Спосіб обробки бочкоподібних зубців / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052065; заявл. 05.05.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

51. Пат. №29761А. Україна, МКИ В23F1/00, В23F21/00. Спосіб нарізування зубчастих коліс з двовгнутими зуб'ями та інструмент для його здійснення/ Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052444; заявл. 27.05.97; опубл. 15.11.2000; Бюл.№6–II.

52. Пат. №68546. Україна, МПК В23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс та інструментів / Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М.; заявник і патентовласник Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М. – №u201111822; заявл. 07.10.2011; опубл. 26.03.2012; Бюл.№6.

53. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70762. Комп'ютерна програма «SCOT»/ Б.С. Воронцов, С.Б Воронцов. – №71352; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

54. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70763. Комп'ютерна програма «СОРТеR»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71353; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

55. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70764. Комп'ютерна програма «APACE»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. –

№71354; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

56. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70765. Комп'ютерна програма «SAIAT»/ Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова, Д.О. Чаплинський. – №71355; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

57. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70766. Комп'ютерна програма «COSET»/ Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська, Д.О. Чаплинський. – №71356; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

58. Воронцов Б.С. Проектирование зуборезного инструмента при помощи системы Pro/ENGINEER / Б.С. Воронцов, В.И. Быковский // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения" [Спец.выпуск]: V междунар. науч.-техн. конф. "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века", 8-11 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонГТУ, 1998. - Вып.6, т.1. – С. 166 – 169.

59. Воронцов Б.С. Применение CAD/CAM/CAE/PDM - систем для моделирования тяговых передач / Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: VIII междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1998. – С.57 – 58.

60. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: междунар. науч.-техн. конф. 13 – 18 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Севастополь: Дон ГТУ, 1999.– Т 2. – С. 254 – 257.

61. Ткаченко В.П. Методы твердотельного моделирования зубчатых колес тяговых передач / В.П. Ткаченко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: IX междунар. науч.-техн. конф., 13 – 17 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1999. – С. 12.

62. Бочарова И.А. Твердотельное компьютерное моделирование зубчатых колес с модифицированными зубьями / И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский // Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості: II міжнар. наук.–техніч. конф., 17 – 21 листоп. 2003 р.: тези

доп. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – С.16-17.

63. Дорошенко Ю.О. Застосування політканинних перетворень у задачах синтезу зубчастих передач / Ю.О. Дорошенко, Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі: міжнар. наук.-практичної конф., 27 – 29 травня 2004 р.: тези доп. – Ізмаїл, 2004. – С. 112 – 113.

64. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещивающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Машиностроение и техносфера XXI века: междунар. науч.-техн. конф., 13 – 18 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2004. – Т.1. – С. 87 – 90.

65. Vorontsov B.S. Improving the efficiency of CAD / CAM / CAE gear systems / B.S. Vorontsov, D.A. Chaplinsky // The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRLUTSTP): VI International Conference, December 2-9, 2007. – Hurghada (Egypt), 2007. – P. 129 – 131.

66. Воронцов Б.С. САПР зубчатых передач / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VI міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2008 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С.20 – 21.

67. Витренко В.А. Гиперболоидный инструмент для нарезания зубьев / В.А. Витренко, Б.С.Воронцов, А.В. Лейба, Д.А. Чаплинский // Машиностроение и техносфера XXI века: XV междунар. науч.-техн. конф., 15-20 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 184 – 188.

68. Воронцов Б.С. Использование программного комплекса Power Solution для изготовления сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VII міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2009 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2009. –

C.17 – 18.

69. Витренко В.А. Формообразование зубьев колес гиперболоидных передач/ В.А. Витренко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 4 червня 2010 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С.23.

70. Воронцов Б.С. Использование теории сплайнов при поверхностном моделировании гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов, М.А. Кашура, В.В. Черноволов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX міжнар. наук.-техн. конф., 31 травня – 3 червня 2011 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С.33 – 34.

71. Воронцов Б.С. Исследование схем формообразования накатного інструмента / Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, М.Н. Кузнецова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XI міжнар. наук.-техн. конф., 4 – 6 червня 2013 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С.34.

72. Воронцов Б.С. Формообразование зубчатых колес с линейным характером касания зубьев / Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Машинобудування – очима молодих: міжнар. наук.-техн. конф., 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: тези доп. – Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С.10.

73. Воронцов Б.С. Формоутворення гіперболоїдних фрез / Б.С. Воронцов, В.О. Вітренко, С.Г. Кириченко // Прогресивні технології в машинобудуванні: всеукр. наук.-техн. конф., 10 – 15 лют. 2014 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – С. 19.

74. Воронцов Б.С. Наукові основи технології реінжинірингу зубчастих зачеплень / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Прогресивні технології в машинобудуванні: VI міжнар. наук.-техн. конф., 6 – 10 лют. 2017 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – С. 28 – 30.

75. Pasichnyk V. Reengineering gear based on the model of unified

description parameter / V. Pasichnyk, B. Vorontsov // *Tecnika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017): IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna*, 6-9 czerwca 2017. – Rzeszów–Czarna. – P.49.

76. Воронцов Б.С., Автоматизация процессов формообразования при механической обработке сложных поверхностей / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XV міжнар. наук.–техн. конф.*, 30 травня – 1 червня 2017 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С.17.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах: VIII, IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми розвитку рейкового транспорту», 1998, 1999, Алушта-Луганськ; II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості», 2003, Миколаїв; V, VI, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Машинобудування і техносфера XXI століття», 1998, 1999, 2004; 2008, Севастополь; Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі», 2004, Ізмаїл; VI International Conference «The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRLUTSTP)», 2007, Hurgada (Egypt); VI, VII, VIII, IX, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Важке машинобудування. Проблеми і перспективи розвитку», 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2017, Краматорськ; Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування – очима молодих», 2013, Кременчук; III, VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивні технології в машинобудуванні», 2014 року, 2017, Львів; IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «Tecnika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017)», 2017, Rzeszów–Czarna (Polska).